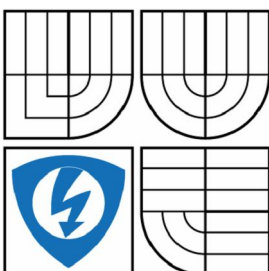


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

AUTOMATIZACE LINKY PRO DEFEKTOSKOPII ŽELEZNIČNÍCH KOL

AUTOMATION OF TEST LINE FOR FLAW DETECTION OF RAILWAY WHEELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK HUBENÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN PÁSEK, CSc.

BRNO 2013

ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ / BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Navrhněte a realizujte řídicí systém pro testovací linku. Tento systém bude ovládat manipulátory nabírající testovaná kola, měřit jejich parametry jako jsou defekty a tvrdost materiálu, třídit je podle výsledku testu a směřovat jejich dopravu z testovacího zařízení. Použijte decentralizovaný řídicí systém PLC S7 s průběžnou vizualizací procesu testování WinCC nebo InTouch.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému pro testovací linku využívající ultrazvukové defektoskopie a magnetické práškové defektoskopie. Testovací linka je určena pro nedestruktivní testování železničních kol s možností detekce a lokalizace povrchových a podpovrchových vad. Práce popisuje uspořádání a princip funkce testovací linky. Na tomto základě je proveden návrh řídicího systému, který řídí jednotlivé procesy v rámci celé testovací linky. Navržený řídicí systém byl realizován v průmyslové aplikaci.

Klíčová slova

Řídicí systém, průmyslové procesy, nedestruktivní testování, ultrazvukové testování, magnetická prášková metoda

Abstract

This thesis describes the design and implementation of a control system for testing line using ultrasonic testing and magnetic particle testing. The test line is designed for non-destructive testing of railway wheels with detection and localization of surface and subsurface defects. The thesis describes the design and operating principles of the test line. On this basis, the design of a control system that controls various processes throughout the test line is clearly described. The proposed control system was implemented in the industrial application.

Keywords

Control systém, industrial processes, non-destructive testing, ultrasonic testing, magnetic particle testing

Bibliografická citace:

HUBENÝ, M. *Automatizace linky pro defektoskopii železničních kol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pásek, CSc..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Automatizace linky pro defektoskopii železničních kol jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **17. května 2013**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Páskovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Stanislavovi Štarmanovi, Ph.D. za podporu a cenné rady ohledně defektoskopických metod a Ing. Alešovi Bitterovi za mnoho praktických rad ohledně programování.

V Brně dne: **17. května 2013**

.....
podpis autora

Obsah

Obsah.....	7
1. Úvod	9
2. Teoretický přehled.....	11
2. 1 Ultrazvuková defektoskopie.....	13
2.1.1 Šíření ultrazvukových vln	14
2.1.2 Dopad ultrazvukových vln na rozhraní.....	15
2.1.3 Útlum ultrazvukových vln.....	17
2.1.4 Ultrazvukové sondy	17
2.2 Magnetická defektoskopie	19
2.2.1 Magnetické pole.....	19
2.2.2 Magnetické pole elektrického proudu.....	19
2.2.3 Magnetické indukční čáry	19
2.2.4 Magnetická indukce	20
2.2.5 Hallův jev	20
2.2.6 Magnetické vlastnosti látek	21
2.2.7 Magnetická prášková metoda.....	22
2.2.8 Podélné (pólové) magnetování	22
2.2.9 Příčné (cirkulární) magnetování	23
2.2.10 Kombinované magnetování.....	23
2.2.11 Magnetovací elektrický proud	24
2.2.12 Zviditelnění rozptylových polí	25
3. Popis testovací linky.....	26
3.1 Návrh testovací linky	26
3.2 Uspořádání testovací linky.....	27
3.2.1 Vstupní část – tryskač	29
3.2.2 Vstupní dopravníky.....	29
3.2.3 Ultrazvukové testování.....	29
3.2.4 Testování pomocí magnetické práškové metody.....	32
3.2.5 Výstupní vozíky	37
3.2.6 Manipulátory	37
4. Decentralizovaný řídicí systém pro testovací linku	39
4.1 Akční a měřicí členy	40
4.2 Úroveň periférií	41

4.3 Řízení procesu	41
4.4 SCADA	41
4.5 Použitá programovací prostředí.....	42
5. Realizace řídicího systému	43
5.1 Popis programu manipulátoru	43
5.2 Komunikace s frekvenčními měniči a parametrizace pohonů	44
5.3 Základní cykly manipulátoru	46
5.3.1 Jízda na pozici s natáčením kola na kamery.....	47
5.3.1 Jízda na pozici s vyhýbáním mezi kamerami	47
5.3.2 Odebírání kola z dopravníku manipulátorem bez laserů v kleštinách	47
5.3.3 Pokládání kola na dopravník manipulátorem bez laserů v kleštinách.....	48
5.3.4 Odebírání kola ze stroje.....	48
5.3.5 Pokládání kola do stroje	48
5.3.6 Odebírání kola z tvrdoměru.....	49
5.3.7 Pokládání kola do tvrdoměru.....	49
5.3.8 Odebírání kola z dopravníku manipulátorem s lasery v kleštinách	49
5.3.9 Pokládání kola na dopravník manipulátorem s lasery v kleštinách.....	50
5.4 Popis programu koncentrátoru	50
5.4.1 Ovládání manipulátorů v automatickém režimu.....	51
5.4.2 Tvorba interní databáze.....	53
5.4.5 Řízení datových přenosů a komunikace s periferními jednotkami.....	57
5.5 Konfigurace frekvenčních měničů.....	58
5.5.1 CPU	58
5.5.2 Zdroj napájení.....	58
5.5.3 Pohony.....	58
5.5.5 Nastavení omezení, ramp a nulové značky	62
5.5.5 Nastavení otáčkového regulátoru.....	63
5.5.6 Nastavení polohového regulátoru.....	64
5.5.7 Monitorovací funkce	64
5.6 Vizualizace procesu ve WinCC flexible 2008 SP2	65
5.6.1 Skriptovací jazyk VISUAL BASIC	66
6. Závěr	67
Použitá literatura	68

1. Úvod

Automatizace procesů v průmyslových aplikacích je v dnešní době relativně již standardní záležitostí. Téměř všechny samočinné části strojů a zařízení používaných a průmyslovém prostředí jsou plně automatizovaně nebo poloautomatizovaně testovány prostřednictvím odpovídajících řídicích systémů. Řídicí systémy jsou právě stěžejním prvkem v automatizovaném systému a zajišťují odpovídající řízení procesu. V současné době se nejčastěji využívají programovatelné automaty (PLC – Programmable Logic Controllers), které díky svým vlastnostem umožňují automatický a bezpečný chod daného průmyslového procesu. Nicméně se v současných aplikacích používá celá řada řídicích systémů vybíraných především na základě typu a vlastnostech daného průmyslového procesu. Tato diplomová práce se právě zabývá návrhem a realizací řídicího systému, který má být využit pro řízení testovací linky. Testovací linka byla již původně navržena na základě reálných požadavků zákazníka. Počáteční požadavky byly následující:

1. Nedestruktivní testování železničních kol – detekce, lokalizace a klasifikace podpovrchových vad
2. Nedestruktivní testování železničních kol - detekce, lokalizace a klasifikace povrchových vad
3. Systém, který umožňuje testovat železniční kola, musí splňovat příslušné lokální normy (Kazachstán)
4. Navržený testovací systém musí být součástí stávajícího výrobního procesu v uspořádání, které má zákazník zavedené

Uvedené požadavky představují pouze výčet těch nejzákladnější. Požadavků bylo více a jsou detailněji uvedeny v předložené diplomové práci. Nicméně vzhledem k zaměření této diplomové práce byly vybrány pouze některé hlavní požadavky, které jsou bodově uvedeny výše. Vzhledem k tomu, že byl požadavek na nedestruktivní testování železničních kol s cílem detekovat, lokalizovat a klasifikovat povrchové a podpovrchové vady, byly jako testovací metody nedestruktivního testování vybrány metody ultrazvuková a magnetická prášková. Hlavním důvodem bylo jednak splnění hlavních požadavků ze strany zákazníka a dále předchozí zkušenost společnosti, která dodání testovací linky zajišťovala. Hlavním úkolem, který je také hlavním cílem této diplomové práce, bylo navrhnout a realizovat řídicí systém, který bude ovládat proces předávání železničních kol z výrobní linky a mezi jednotlivými testovacími metodami (linkami). Tento systém má především zajistit součinnost všech okolních systémů nacházejících se v okolí testovacích linek. Samotná práce se ovšem zabývá i procesy testování, tedy řízení procesů v uvedených testovacích linkách a dále předávání železničních kol mezi jednotlivými linkami v závislosti na výsledku testování. Součástí návrhu systému je i realizace systému vyhodnocení výsledků měření.

Jak již bylo uvedeno, pro testování železničních kol na povrchové a podpovrchové vady byly využity metody pro nedestruktivní testování materiálů. V druhé kapitole této diplomové práce je uveden nejprve stručný teoretický přehled metod nedestruktivního testování. Součástí této kapitoly je ovšem i detailní teoretický popis použitých metod nedestruktivního testování. Popsány jsou metoda ultrazvuková a magnetická prášková. Právě tyto metody byly použity pro testování železničních kol a jednotlivá železniční kola jsou postupně těmito metodami testována. Další kapitola

nejprve obsahuje obecný popis navržené testovací linky. V této kapitole je uvedeno uspořádání samotných testovacích linek využívající metody ultrazvukové a magnetické a předávání železničních kol mezi výrobním systémem, systémem čištění a dále mezi samotnými linkami. Kapitola následující je zaměřena na řídicí systém, který byl pro účely testování a řízení procesů navržen. V kapitole páté je detailní popis navrženého řídicího systému a jednotlivých částí testovací linky, které jsou tímto systémem řízeny a ovládány. V kapitole šesté je uvedeno shrnutí dosažených výsledků a cílů. Úvodem je nutné uvést, že systém zde prezentovaný byl prakticky navržen a realizován a v současné době je nasazen ve výrobním závodě Ekibastuz ve státě Kazachstán. Řešitel této diplomové práce se teoreticky i prakticky podílel na realizaci této testovací linky a jednotlivých procesů, které jsou pro tuto linku využívány.

2. Teoretický přehled

Defektoskopie [1], [2], [3] je obecný název pro testování materiálů zaměřená na detekci a lokalizaci povrchových nebo podpovrchových vad a trhlin. Defektoskopie se obecně zabývá destruktivním nebo nedestruktivním testováním materiálů. Vzhledem k tomu, že je tato práce zaměřena především na ultrazvukovou a magnetickou metodu, bude v dalším textu uveden popis pouze metod nedestruktivních. Vývoj v oblasti nedestruktivního testování [4], [5] je přímo spojen se zvyšujícím se zájmem o bezpečnost, vývojem nových materiálů a celkovou snahou o větší spolehlivost výrobků. Změny, které proběhly s vývojem v letectví, nukleární energetice a zkoumání vesmíru, velkou měrou přispěly k pokroku, který se udál v tomto oboru. Bez detailního testování materiálů by nebyla zajištěna bezporuchovost, spolehlivost a bezpečnost v různých oborech lidské činnosti. Hlavním cílem defektoskopie není pouze vyřazení vadných výrobků, ale také ujištění, že dobré výrobky jsou dle technických podmínek provozuschopné [2], [3], [5].

Existuje celá řada defektoskopických metod, ale neexistuje metoda, která by byla jednoznačně použitelná k pokrytí všech požadavků za všech okolností. Při volbě defektoskopické metody je nutné vycházet z řady faktorů (mechanické a dle použité metody také elektromagnetické vlastnosti testovaného materiálu, rozměry objektu, okolní prostředí, umístění objektu z hlediska přístupnosti aj.).

Základní metody nedestruktivního testování materiálů jsou následující:

Vizuální metody

Vizuální metoda [1] využívá světla odraženého od objektu, které se následně vyhodnocuje okem nebo detektory, které jsou citlivé v daném spektru elektromagnetického záření. Výhodou jsou materiálově neomezené možnosti využití a rychlé vyhodnocení nežádoucích změn. Tyto metody umožňují vyhodnocovat pouze povrchové defekty (nutné osvětlení povrchu testovaného objektu), což je jejich hlavní nevýhodou.

Metody kapilární

Tato metoda [1], [2], [3] pracuje s kapalinou obsahující viditelné nebo fluorescenční barvivo se nanáší na povrch testovaného objektu. Díky kapilárnímu působení dojde ke zviditelnění necelistvostí. Hlavní výhodou této metody je použitelnost prakticky na všechny čisté, nesavé materiály. Další výhodou je citlivost na velmi malé necelistvosti. Základní nevýhodou je potom vyhodnocování pouze malých povrchových otevřených necelistvostí.

Metody magnetické

Tato metoda [1], [2], [3], [10] spočívá v prvotním zmagnetizování testovaného materiálu a následně vyhodnocování magnetického rozptylového pole. Vyhodnocování je provedeno buď zviditelněním necelistvosti prostřednictvím malých feromagnetických částic nanesených na povrch materiálu nebo elektrickými snímači magnetického pole. Výhodou této metody je citlivost na malé necelistvosti a v porovnání s metodou kapilární se jedná o metodu relativně rychlou. Mezi nevýhody této metody se řadí omezení na povrchové a těsně podpovrchové defekty a možnost využití

na pouze feromagnetické materiály. Citlivost této metody je závislá na orientaci magnetického pole vůči necelistvosti. Po každém provedení vyhodnocení využitím této metody musí být testovaný objekt demagnetizován.

Vířivé proudy

Metoda vířivých proudů [1], [5] a [6] je založená na vyhodnocení výsledného magnetického toku budící cívky a na toku vybuzených vířivých proudů v testovaném objektu. Hustota vířivých proudů se mění vlivem necelistvosti v materiálu. Výhodou této metody je rychlost a velká citlivost vyhodnocení defektů. Nevýhodou je použitelnost pouze pro elektricky vodivé materiály, omezení frekvenčně závislou hloubkou vniku elektromagnetického pole, povrch objektu musí být hladký a přístupný pro umístění sondy.

Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková defektoskopie [7], [8], [9] je nedílnou součástí nedestruktivního testování materiálů (NDT), určená k detekci podpovrchových vad. Nejčastěji používanou metodou pro měření ultrazvukových signálů je metoda impulsová odrazová, kterou lze detekovat a lokalizovat vady v testovaných materiálech. Základem přístrojového vybavení této metody je ultrazvuková sonda, pomocí níž je ultrazvuková vlna vysílána do testovaného materiálu a následně i přijímána. Ultrazvuková vlna je pomocí piezoelektrického měniče transformována na elektrický signál. Odražené ultrazvukové vlny jsou v sejmutém elektrickém signálu zastoupeny obálkou ultrazvukového signálu tzv. ultrazvukovými echy. Vyhodnocování pak spočívá v analýze ultrazvukového signálu a reprezentaci jednotlivých ultrazvukových ech.

Výhodou ultrazvukové metody je velká citlivost na necelistvosti uvnitř objektu. K hlavním nevýhodám patří nutnost hladkého povrchu pro umístění sondy. Vzhledem k tomu, že se jedná o metodu kontaktní, je nutné mezi sondou a testovaným materiálem využít odpovídající vazební prostředí (kapalinu).

Akustická emise

Vznikající a rozšiřující se necelistvosti v materiálu generuje elastické vlny, které se na povrchu objektu snímají piezoelektrickými senzory. Výhodou akustické emise [1], [2], [4] je možnost monitorování velké plochy z hlediska rozrušování struktury a predikce závažných defektů. Výčet nevýhod začíná nutností kontaktu senzoru nebo zvukovodu k senzoru s povrchem tělesa, je zapotřebí umístit současně více senzorů a vyhodnocení je možné až po zpracování změřených signálů.

Metody prozařovací

Zkoušky prozařováním [1], [2], [3] jsou založeny na vyhodnocování závislosti koeficientu záření rentgenového nebo gama záření v důsledku přítomnosti případných povrchových nebo vnitřních necelistvostí v testovaném materiálu. Mezi výhody prozařovacích metod lze počítat použitelnost pro většinu materiálů včetně kompozitů nezávisle na jejich tvaru a povrchu. Nevýhodou je omezení tloušťky dle hustoty materiálu, kritická vzájemná orientace rovinné necelistvosti a paprsku záření, nebezpečné radiační prostředí a nemožnost lokalizace hloubky vady.

Infračervená defektoskopie

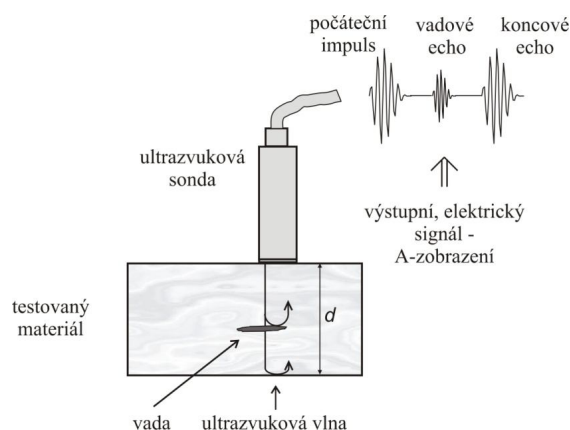
Infračervená defektoskopie [1], [2], [3] využívá změny povrchové teploty testovaného objektu, která je zapříčiněna změnou struktury a rozměru tělesa, u něhož dochází k vývinu nebo absorpci tepla. K vyhodnocení teploty se používají pyrometry a

termovize. Z výhod lze jmenovat použitelnost pro většinu materiálů včetně kompozitů, citlivost na velmi malé změny teploty, aplikace je pro malé tak velké plochy povrchu tělesa a možnost průběžného záznamu signálu. Nevýhodou je neefektivnost metody pro trhliny v tenkém materiálu.

2. 1 Ultrazvuková defektoskopie

Významnou metodou v defektoskopickém oboru jsou zkoušky ultrazvukem [1], na jehož využití poprvé upozornil sovětský fyzik Sokolov. Jeho praktické využití však muselo počkat až do padesátých let, kdy došlo k významnému rozvoji elektroniky. Ultrazvuk [7], [8], stejně jako zvuk a hluk, je mechanické kmitání částic (hmotných elementů) kolem rovnovážné polohy, šířící se ultrazvukovou vlnou v pružném prostředí ve frekvenčním rozsahu nad 20 kHz. Pro defektoskopické účely se běžně pracuje ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 50 MHz, výjimečně až do 200 MHz.

Ultrazvuková defektoskopie je nedílnou součástí nedestruktivního testování materiálů, určenou především k detekci podpovrchových vad. Současný stav ultrazvukové defektoskopie umožňuje detekci vad v materiálech používaných v různých odvětvích průmyslu. Nejčastěji používanou metodou pro měření ultrazvukových signálů je metoda impulsová odrazová [7], kterou lze detekovat a především lokalizovat vady v materiálech. Základem přístrojového vybavení dané metody je ultrazvuková sonda, prostřednictvím níž je ultrazvuková vlna vysílána do testovaného materiálu tloušťky d . Ultrazvuková vlna prochází vnitřní strukturou testovaného materiálu a následně je stejnou ultrazvukovou sondou i přijímána. Ultrazvuková vlna je pomocí piezoelektrického měniče transformována na elektrický signál. Odražené ultrazvukové vlny jsou v sejmutém elektrickém signálu zastoupeny obálkou ultrazvukového signálu tzv. ultrazvukovými echy. Princip metody impulsové odrazové je uveden na obr. 1. Zaznamenaný ultrazvukový signál se skládá z ultrazvukového echa, které vzniká odrazem vlny od koncové stěny měřeného objektu (tzv. koncové echo) a echa od vad a trhlín (tzv. vadové echo).



Obr. 1 Princip ultrazvukové defektoskopie

Ultrazvukem se rozumí mechanické kmitání částic kolem jejich rovnovážné polohy, které se šíří prostorem. Toto kmitání lze znázornit jako sinusoidu s okamžitou výchylkou:

$$u = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

kde A je amplituda výchylky (m), ω je úhlová rychlost (rad.s^{-1}), a φ je fázový úhel.

Okamžitou výchylku libovolného bodu prostředí označujeme jako akustickou výchylku a popíšeme ji rovnicí

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (2)$$

kde T je perioda pohybu (s), λ je vlnová délka (m), c je rychlost šíření vlny hmotným prostředím (m.s^{-1}), x je souřadnice polohy částice (m), f je frekvence kmitů částice (Hz). Podle [6] je akustická výchylka vektorová veličina udávající okamžitou vzdálenost elementu prostředí od jeho rovnovážné polohy. Fáze je definována jako fázový úhel, při kterém dosahují částice stejné výchylky. Akustická rychlost v kmitajících částic prostředí je dána vztahem:

$$v = A \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (3)$$

Akustický tlak p při průchodu vlny prostředím je dán vztahem

$$p = \rho c v = p_A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = A \omega \rho c \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (4)$$

kde p_A je amplituda akustického tlaku ρ hustota prostředí.

Akustický tlak je pro testování materiálu ultrazvukem podstatný, protože je úměrný elektrickému napětí na elektrodách ultrazvukové piezoelektrické sondy. Měrný akustický vlnový odpor (dále jen akustický odpor) Z pro rovinnou podélnou vlnu je dán vztahem

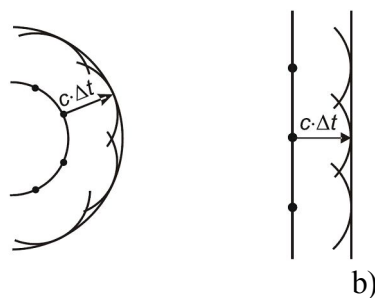
$$Z = \text{Re } Z = \rho c, \quad (5)$$

kde Z akustická impedance (komplexní číslo).

Akustická impedance Z je obecně komplexní číslo dané poměrem akustického tlaku a akustické rychlosti materiálu s ideálními elastickými vlastnostmi.

2.1.1 Šíření ultrazvukových vln

Z každé rozkmitané částice [7] se rozruch šíří do všech směrů. Je-li prostředí izotropní tj. má ve všech směrech stejné vlastnosti, pak se vlna šíří v různých směrech za stejnou dobu a vzniká tzv. vlnoplocha tj. plocha, jejíž body kmitají se stejnou fází (a mají od zdroje vlnění stejnou vzdálenost). Každý bod, do něhož dospěla v čase t vybraná vlnoplocha, se stává dle Huygensova principu sám zdrojem elementárního rozruchu, který se kolem něj dále šíří ve formě elementárních vlnoploch (v homogenním prostředí kulových). Výslednou vlnoplochu v čase $t + \Delta t$ získáme jako vnější obálku těchto elementárních vlnoploch. Vlnoplochy mohou mít libovolný tvar, ale podstatné jsou dva typy: kulová a rovinná vlnoplocha.

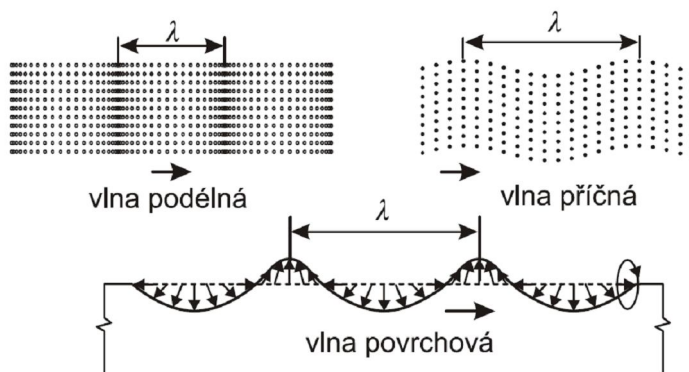


Obr. 2 Vlnoplochy: a) kulová, b) rovinná

Ultrazvukové vlny se dále dělí dle pohybu částic prostředí vzhledem ke směru šíření vlny [6]. V plynu a kapalině se šíří pouze podélná ultrazvuková vlna formou zhušťování a zředňování molekul ve směru šíření, u tuhého tělesa molekuly nebo hmotné elementy mohou kmitat v různých směrech. Kromě podélných vln se v prostředí šíří různé módy příčných vln, u nichž je nutné udávat rovinu ve které ke kmitání dochází. Pokud dochází ke kmitům v jediné rovině, vlny jsou lineárně polarizované.

Typy ultrazvukových vln dle směru šíření dělíme na:

- podélné (longitudinální) – Částice se u této vlny pohybují ve směru šíření vlny. Při šíření vlny dochází ke zhušťování a zředňování částic prostředí a změně jeho objemu.
- příčné (transverzální) – Částice prostředí se pohybují kolmo ke směru šíření vlny.
- povrchové (Rayleighovy) vlny - šíří na volném povrchu pevné látky do hloubky vlnové délky příčné vlny, částice prostředí se pohybují po eliptické dráze
- deskové (Lambovy) vlny - šíří v desce, jejíž tloušťka je srovnatelná s vlnovou délkou při určitých hodnotách úhlu lomu a frekvence



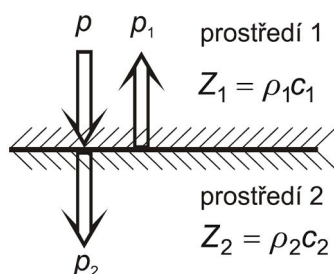
Obr. 3 Vlna podélná, příčná a povrchová (Rayleighova)

Jak již bylo uvedeno u kapalin a plynů se šíří pouze podélné vlny. V pevných látkách se šíří všechny druhy vln. Pokud budou rozměry pevného tělesa v jednom (deska, plech) nebo ve dvou směrech (drát, trubka) srovnatelné s vlnovou délkou, vlny se již nešíří jako povrchové (Rayleighovy) vlny, ale vlny deskové (Lambovy) (Obr. 3).

2.1.2 Dopad ultrazvukových vln na rozhraní

Princip ultrazvukové defektoskopie je možné ukázat na kolmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí. [6] Dopadne-li podélná vlna kolmo na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu vlny (Obr. 4). Na rozhraní definujeme

koeficient odrazu R jako poměr odraženého akustického tlaku p_1 a dopadajícího akustického tlaku p a koeficient průchodu D jako poměr prošlého akustického tlaku p_2 k tlaku dopadajícímu p_1 .



Obr. 4 Dopad ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí

Dle vztahu (4) pro akustický odpor Z platí [6]:

$$\begin{aligned} p &= p_A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = \rho_1 c_1 v = Z_1 v \\ p_1 &= p_{A1} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c_1} \right) = -\rho_1 c_1 v_1 = -Z_1 v_1 \\ p_2 &= p_{A2} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c_2} \right) = \rho_2 c_2 v_2 = Z_2 v_2 \end{aligned} \quad (6)$$

přičemž na rozhraní, které považujeme za počátek dráhy tj. $x = 0$, je kontinuita akustických tlaků a rychlostí tj. $p_2 = p + p_1$ a $v_2 = v + v_1$. Dosazením p_2 , p , p_1 a v_2 , v , v_1 ze vztahu (6) dostaneme vztahy [6]:

$$\begin{aligned} p_{A2} &= p_A + p_{A1} \\ \frac{p_{A2}}{Z_2} &= (p_A - p_{A1}) \frac{1}{Z_1} \end{aligned} \quad (7)$$

Na základě tohoto lze pak definovat koeficient odrazu R [6]:

$$R = \frac{p_{A1}}{p_A} = \frac{1 - m}{1 + m} \quad (8)$$

Na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu ultrazvukových vln v poměru R .

Koeficient průchod se pak definuje jako [6]:

$$D = \frac{p_{A2}}{p_A} = 1 + R = \frac{2}{1 + m}. \quad (9)$$

Koeficient m je poměrem akustického odporu Z_1 a Z_2 obou prostředí:

$$m = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}. \quad (10)$$

Uvedené vztahy platí pro všechny druhy vln [6]. Na rozhraní mohou vzniknout tři možnosti. Pro $m = 1$ nedochází na rozhraní k odrazu, pro $m > 1$ je fáze odraženého akustického tlaku opačná než fáze tlaku dopadající vlny, pro $m < 1$ se fáze nemění. I velmi tenká mezera mezi sondou a zkoušeným povrchem znemožňuje průchod ultrazvuku. Proto se tato mezera vyplňuje vhodným kapalným nebo polotuhým médiem, které nazýváme akustická vazba. Jako vazební prostředky se pak nejčastěji využívají olej, vazelína, glycerín, a další speciální vazební prostředky dodávané různými firmami.

2.1.3 Útlum ultrazvukových vln

Prochází-li vlna prostředím, dochází k jejímu útlumu a to vlivem [7]:

- absorpce, při níž dochází k pohlcování energie vnitřním třením a elasticou hysterezi a následnou přeměnou ultrazvukové energie na jiné druhy energie (obvykle na tepelnou),
- rozptylu, při němž dochází k odrazu ve struktuře materiálu (zrna, póry, fázové změny v kovu), k difrakci (tj. ohybu vlnového pole) a k lomu ve směru šíření vlny na rozhraní,
- divergence (tj. rozbíhavosti tvaru pole) a disperze způsobené různou rychlostí šíření vlny dle jejího módu a frekvence.

Pro pokles amplitudy akustického tlaku je definován koeficient útlumu α ze vztahu

Struktura tuhých látek je často nehomogenní. Proto činitel útlumu α je dán součtem dílčích útlumů:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad (11)$$

kde α_p je útlum daný pohlcováním a α_r je útlum daný rozptylem.

Ztráty při útlumu pohlcováním jsou způsobeny vnitřním třením a elasticou hysterezi (na vyšších frekvencích), a proto jsou přímo úměrné frekvenci. Na vyšších frekvencích je činitel útlumu dán převážně rozptylem α_r . Obecně platí, že se stoupající velikostí nehomogenit nebo anizotropií krystalů tvořících strukturu se zvyšují i ztráty rozptylem. Útlum způsobený rozptylem je závislý na poměru střední velikostí nehomogenit \bar{D} a délky vlny λ . Ztráty způsobené rozptylem bývají obvykle vyšší u příčných vln než u podélných.

Útlum ultrazvuku v pevných látkách stoupá s teplotou. V prostředích s nižší rychlostí šíření (jakou mají např. plasty) je tento nárůst patrný již při teplotách nižších než 50 až 100 °C. U kovů je zvýšení útlumu prakticky pozorovatelné až při teplotách nad 200 °C.

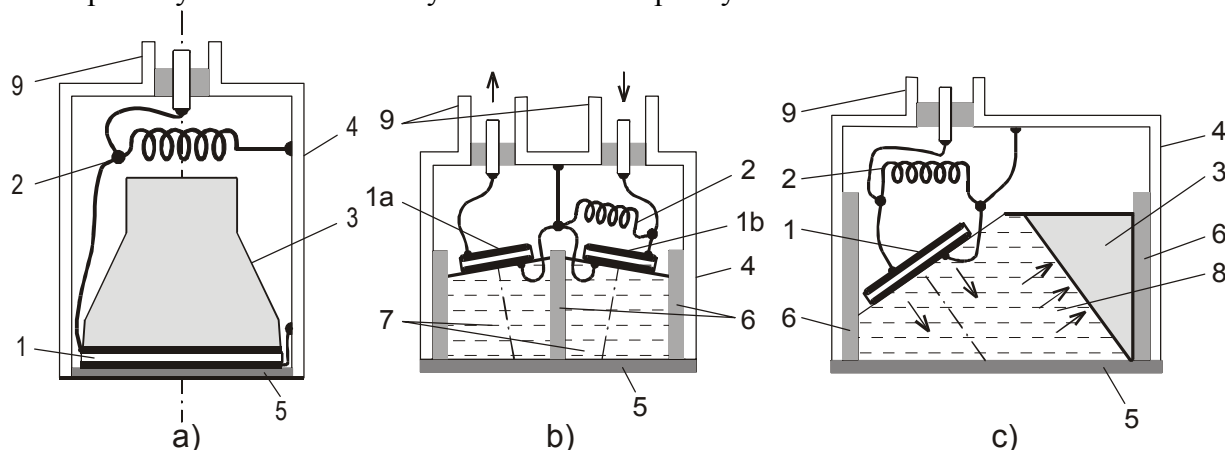
2.1.4 Ultrazvukové sondy

Ultrazvukové sondy, nebo akustické snímače, jsou v principu převodníky určené k měření některé fyzikální veličiny [6], [8]. Ultrazvukové sondy slouží k transformaci mechanické energie kmitů ultrazvukových vln na energii elektrickou (přijímač) nebo naopak (vysílač). Elektrický signál z přijímače označujeme jako ultrazvukový signál. Jako akustické měniče se pro frekvenční pásmo od 100 kHz výše nejčastěji používají piezoelektrické měniče na bázi feroelektrik. Pro nižší frekvence se hodí spíše sondy magnetostrikční, ale i tyto sondy jsou dnes nahrazovány sondami piezoelektrickými.

Ultrazvukové sondy lze dělit podle různých hledisek. Podle druhu vysílaných a přijímaných ultrazvukových vln lze rozlišit sondy pro vlny podélné, příčné, povrchové atd. Podle provedení lze sondy dělit na přímé, vysílající kolmo k povrchu, a sondy úhlové. Provedení jednotlivých druhů sond je na obr. 5.

Přímé sondy vysílají a přijímají ultrazvukové vlny kolmo k povrchu nebo pod úhlem málo odchylným od kolmice k povrchu sondy. Přímé sondy mohou být buď jednoduché (jednoměničové), v nichž vysílá i přijímá společný měnič, a dvojité (dvouměničové), což jsou v podstatě dvě oddělené sondy ve společném krytu. Jedna část dvojité sondy pouze vysílá a druhá pouze přijímá.

Úhlové sondy vysílají a přijímají ultrazvukové vlny pod určitým úhlem k povrchu zkoumaného materiálu. Jsou založeny na lomu vln, tj. využívají zejména transformace podélných vln na příčné vlny. Základem úhlové sondy je klínový nástavec, na který je přilepen piezoelektrický měnič. Nástavec bývá nejčastěji ze speciálního plexiskla nebo jiného prostředí, např. i kapalného, ve kterém je rychlost šíření podélných vln menší než rychlost šíření vln příčných.



Obr.6 Ultrazvukové defektoskopické sondy – a) přímá sonda, b) dvojitá sonda, c)úhlová sonda
 1 - piezoelektrický měnič, (1a - vysílací měnič, 1b - přijímací měnič, 2 - přizpůsobovací cívka, 3 - tlumící těleso, 4 - pouzdro sondy, 5 - ochranná vrstva, 6 - akustická izolace, 7 - nástavce, 8 - klínové těleso, 9 - konektor

Ultrazvukové sondy je dále možné dělit podle několika dalších kritérií na:

1. Podle typu:
 - a. Přímá
 - b. Úhlová
 - c. Dvojitá
 - d. Fokusuující, imerzní, atd.
2. Podle tvaru měniče:
 - a. Kruhový
 - b. Půlkruhový
 - c. Pravoúhelníkový
3. Podle druhu měniče:
 - a. Piezoelektrická (0,1 - 25 MHz)
 - b. Magnetostrikční (20 – 100 kHz)
1. Piezoelektrické měniče

2. Piezoelektrické sondy
3. Piezoelektrické kompozity
4. EMAT (Elektromagnetický měnič)

2.2 Magnetická defektoskopie

Při nedestruktivním testování povrchových vlastností měřeného objektu je magnetická defektoskopie [10] – [14] jednou z nejvhodnějších metod. Magnetická metoda je vhodná především díky své jednoduchosti, příznivé ceně použitých zařízení a snadné obsluze. Princip magnetické defektoskopie spočívá ve vhodném zmagnetování testovaného objektu, na kterém se nacházejí feromagnetická tělíska, která vlivem rozptylových polí indikují povrchové vady. Vzhledem k tomu, že se feromagnetická tělíska nacházejí ve fluorescenční kapalině, je pak možné pomocí ultrafialového záření detekovat povrchové vady. Detekce spočívá především v rozpoznání vad obsluhou. V dnešní době je ovšem čím dál větší tlak na automatizovanou detekci a lokalizaci povrchových vad. Aby byla metoda magnetické defektoskopie účinná, musí být splněny jisté teoretické předpoklady, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

2.2.1 Magnetické pole

Magnetické pole [12] je druh silového pole, které vytváří vodič s proudem, pohybující se částice nebo těleso s elektrickým nábojem, zmagnetované těleso (např. magnet) a proměnné elektrické pole. Magnetické pole je zvláštní případ pole elektromagnetického.

Magnetické pole, jehož charakteristické veličiny (např. magnetická indukce) se s časem nemění, je stacionární magnetické pole. Vytváří ho nepohybující se vodič s konstantním proudem, proud částic s nábojem při pohybu rovnoměrném přímočarém a nepohybující se magnet.

Magnetické pole se projevuje silovými účinky a můžeme ho prokázat různými způsoby. V nejjednodušším případě zjišťujeme magnetické pole magnetkou.

2.2.2 Magnetické pole elektrického proudu

V roce 1820 zjistil dánský fyzik H.Ch. Oersted (1777–1851) pomocí magnetky, že v okolí vodiče s proudem je magnetické pole. Tím byla prokázána souvislost magnetického pole s polem elektrickým. Tento pokus je také důkazem, že magnetické pole proudu působí na magnet. Silové působení je však vzájemné a magnet působí svým magnetickým polem na vodič s proudem. Magnetické pole také působí na pohybující se částice s nábojem. Jelikož u elektrického proudu jde opět o pohyb nabitých částic, můžeme tato tvrzení zobecnit:

Magnetické pole působí jen na pohybující se částice, popř. tělesa s elektrickým nábojem. Na zmagnetovaná tělesa magnetické pole působí nezávisle na tom, zda jsou v klidu, nebo se pohybují. Silové působení magnetického pole je vzájemné a projevuje se přitažlivými nebo odpudivými účinky.

2.2.3 Magnetické indukční čáry

Magnetické indukční čáry [10] jsou prostorově orientované křivky, jejichž tečny v daném bodě mají směr podélné osy velmi malé magnetky umístěné v tomto bodě. Směr od jižního k severnímu pólu magnetky určuje orientaci magnetické indukční čáry.

Magnetické indukční čáry jsou ve všech případech uzavřené křivky a nikde se neprotínají. To platí i pro tyčový magnet, jehož magnetické indukční čáry procházejí nejen vně, ale i uvnitř magnetu. Vně jsou orientovány od severního pólu k jižnímu a uvnitř směřují od jižního pólu k severnímu.

Skutečnost, že magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené křivky, je pro magnetické pole charakteristická. Tím se liší tento druh pole od pole elektrického, tvořeného nepohyblivými tělesy s nábojem. Elektrické siločáry začínají a končí na nabitých tělesech (jde o pole zřídlové). V magnetickém poli obdobný zdroj pole neexistuje a toto pole označujeme jako pole vírové.

2.2.4 Magnetická indukce

Na přímý vodič s proudem působí v magnetickém poli magnetická síla jejíž velikost závisí na proudu ve vodiči, na aktivní délce vodiče (tj. délce té části vodiče, kterou vodič zasahuje do magnetického pole) a na směru, který má vodič, a tedy i proud vzhledem ke směru magnetických indukčních čar. V homogenním magnetickém poli je velikost síly F (magnetická, Ampérova síla) určena vztahem:

$$F = BI \ell \sin \alpha \quad (12)$$

Veličina B se nazývá magnetická indukce. Je to vektorová veličina a úplně charakterizuje magnetické pole. Někdy se k určení magnetického pole užívá další vektor H , který se nazývá intenzita magnetického pole.

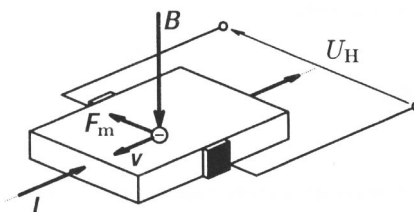
$$B = \frac{F}{I \ell \sin \alpha}, \quad H = \frac{1}{\mu_0} B \quad (13)$$

kde μ_0 je permeabilita a $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (NA}^{-2}\text{)}$.

2.2.5 Hallův jev

Hall [13] provedl roku 1879 tento pokus: Vodivý pásek tloušťky d a šířky b opatřil na obou bočních okrajích kontakty, aby mohl měřit příčné elektrické napětí U mezi okraji, když páskem procházel rovnoběžně s okraji proud I . Pozoroval, že mezi oběma okraji vzniklo napětí, jestliže na pásek působil magnetickým polem kolmým k povrchu pásku:

Jestliže do homogenního magnetického pole umístíme destičku z kovu nebo polovodiče, přemísťují se volné částice s nábojem působením magnetické síly k jedné boční stěně destičky. To se projeví vznikem malého Hallova napětí mezi bočními stěnami (viz Obr. 7).



Obr. 7 Hallovo napětí

Toto napětí U je přímo úměrné proudu I , magnetické indukci B a nepřímo úměrné tloušťce pásku d :

$$U = \tilde{R} \frac{IB}{d} \quad (14)$$

Hallova konstanta \tilde{R} má pro některé vodiče kladnou, pro jiné zápornou hodnotu. Na Hallovu jevu [14] je především založeno měření magnetických polí. Polovodivý pásek s postranními kontakty se vloží do měřeného pole a vede se jím slabý, přesně známý proud a měří se Hallovo napětí. Tyto přístroje se nazývají **teslametry** (měřiče magnetické indukce).

2.2.6 Magnetické vlastnosti látek

Velikost magnetické indukce magnetického pole vodiče s proudem, např. cívky, závisí také na permeabilitě prostředí [12], v němž se cívka nachází. Například ocel má značnou relativní permeabilitu (řádově 1000). Proto je magnetická indukce pole cívky navinuté na ocelovém jádře mnohem větší než u téže cívky bez jádra.

Většina látek ovšem nemá tak velkou relativní permeabilitu a u některých je dokonce menší než 1, takže látka vlastně magnetické pole zeslabuje. Hodnota relativní permeability atomů je určena vlastnostmi atomů, z nichž je látka složena. K tomuto poznatku dospěl již Ampere, který tvrdil, že magnetické vlastnosti látek určují elektrické proudy uvnitř těchto látek.

Velmi zjednodušeně si můžeme představit, že elektrony v atomech se pohybují po malých uzavřených smyčkách a vytvářejí elementární magnetická pole, která se skládají a vytvářejí výsledné magnetické pole atomu. Podle uspořádání elektronů v atomu může nastat případ, že se magnetická pole uvnitř atomu navzájem zcela ruší. Takové atomy nazýváme **diamagnetické**. Pokud se elementární magnetická pole ruší jen částečně, jsou atomy **paramagnetické**.

Tím vysvětlujeme existenci tří základních skupin magnetických látek:

1. **Diamagnetické látky** se skládají z diamagnetických atomů a mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1. To znamená, že mírně zeslabují magnetické pole. Patří sem inertní plyny, zlato, měď, rtuť aj.
2. **Paramagnetické látky** se skládají z paramagnetických atomů a jejich relativní permeabilita je nepatrně větší než 1. Mírně zesilují magnetické pole. Patří sem např. sodík, draslík, hliník a řada dalších prvků. Magnetické pole v paramagnetické látce nelze zesílit ani vnějším polem o velké magnetické indukci.
3. **Feromagnetické látky** jsou složeny také z paramagnetických atomů, ale v takovém uspořádání, že značně zesilují magnetické pole. Jejich relativní permeabilita má velkou hodnotu (10^2 až 10^5).

Již slabým magnetickým polem lze u feromagnetických látek vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí. Dochází k magnetování látky a magnetické pole v ní zůstává, i když vnější působení zanikne.

Feromagnetismus látek se projevuje jen tehdy, když je materiál v krystalickém stavu. V kapalném nebo plynném stavu se feromagnetické látky chovají jako látky paramagnetické. Feromagnetismus je tedy vlastností struktury látky, nikoli jednotlivých atomů.

Pro každou feromagnetickou látku existuje určitá teplota, při jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou. Tato teplota se nazývá **Curieova teplota**.

Mezi feromagnetické látky patří také látky **ferimagnetické** neboli **ferity**. Jsou to často sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů (Mn, Ba). Mají mnohem větší

elektrický odpor než kovové feromagnetické látky a našly široké využití v praxi jako **permanentní magnety**.

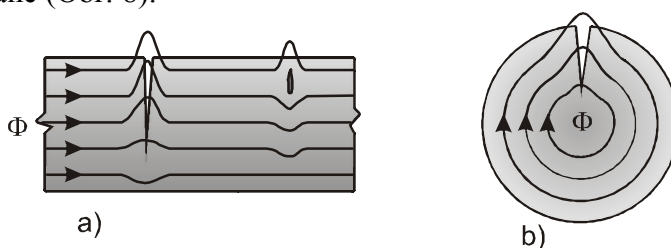
2.2.7 Magnetická prášková metoda

Zkoušení magnetickou práškovou metodou [10] – [14] je založeno na zviditelnění nebo změření rozptylového magnetického pole nad povrchovou nebo těsně podpovrchovou trhlinou nebo magneticky nevodivou nehomogenitou ve feromagnetickém materiálu (feritických ocelích, železe, niklu, kobaltu aj.). Výhodou metody je jednoduchost, snadná obsluha, až na výjimky neomezený tvar a rozměr objektu, možnost pokrytí objektu včetně vnitřku trhlín tenkou vrstvou laku nebo magneticky nevodivého materiálu, možnost použití na automatické výrobní lince. Nevýhodou metody je omezení na feromagnetické materiály s hodnotou relativní permeability $\mu_r > 100$ a tedy nepoužitelnost pro nerezové ocele, měď, hliník, titan a jiné kovy. Další nevýhodou jsou rozměrné zdroje magnetizačních proudů a při metodě přímého průchodu elektrického proudu možnost opalů v místě kontaktu s měřeným objektem. Detekce povrchových defektů je omezena zhruba do hloubky 6 mm. Po vlastní aplikaci metody je nutno objekt odmagnetizovat.

Principem metody je zmagetování objektu a vyhodnocení rozptylu magnetického toku v okolí defektu. Fyzikální princip metody spočívá v lokálním zmenšení průřezu S feromagnetického materiálu, a tím navýšení magnetického odporu v místě povrchové nebo podpovrchové nečistosti. V místě magneticky nevodivé vady s hodnotou permeability $\mu_r > 1$ navíc dochází ke strmé změně směru indukčních linií. Důsledkem výše uvedených jevů je vznik magnetického rozptylu tj. vystoupení magnetického toku Φ do okolního prostoru (vzduchu). Defekt v materiálu lokalizujeme měřením magnetického rozptylu.

Rozptyl magnetického toku je dán nejen velikostí, tvarem a umístěním defektu, ale také volbou magnetování objektu (stejnoseměrné, střídavé nebo pulzní pole), na hodnotě magnetické indukce a na orientaci magnetického toku vůči trhlině.

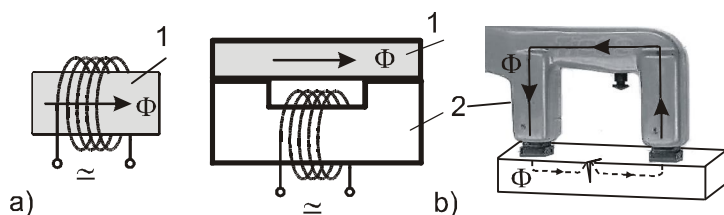
Základním požadavkem při magnetování objektu je správná orientace indukčních čar ve směru kolmém na směr předpokládané nečistosti. Podélné magnetování detekuje trhliny v materiálu příčně orientované a příčné magnetování podélně orientované (Obr. 8).



Obr. 8 Rozptylové magnetické pole nad defektem (a – příčně orientovaná povrchová trhlina a podpovrchový defekt, b – podélně orientovaná trhlina)

2.2.8 Podélné (pólové) magnetování

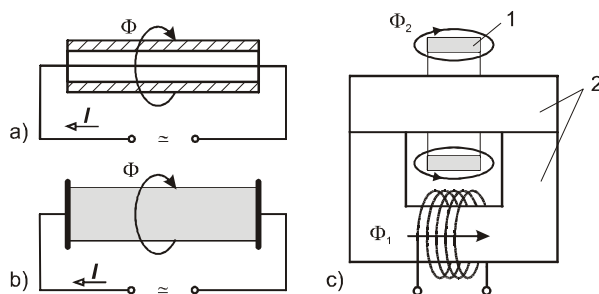
Podélné magnetování (Obr. 9) lze realizovat vložením měřeného tělesa do cívky napájené elektrickým proudem, přiložením permanentního magnetu nebo elektromagnetu na povrch měřeného tělesa. Nevýhodou tohoto způsobu magnetování je většinou nedefinovatelný magnetický odpor kontaktu jha s tělesem, což může ovlivnit hodnotu magnetické indukce a deformaci magnetického pole.



Obr. 9 Podélné magnetování (a – cívkové uspořádání, b – uspořádání s elektromagnetem, 1 – měřený objekt, 2 – elektromagnet)

2.2.9 Příčné (cirkulární) magnetování

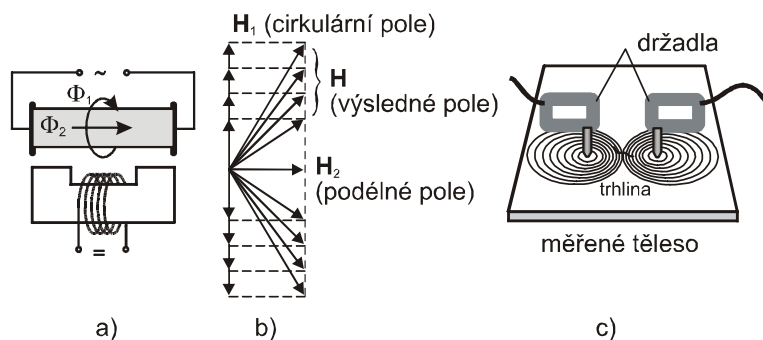
Příčné magnetování (Obr. 10) se docílí průchodem elektrického proudu měřeným tělesem; nevýhodou tohoto magnetování je nebezpečí opalů v místech dotyků elektrod, elektrickým proudem procházejícím vodičem vloženým do měřeného objektu trubkového nebo prstencového tvaru, indukcí proudu v měřeném tělese, které si lze představit jako sekundární závit nakrátko v transformátoru.



Obr. 10 Příčné magnetování (a – pomocným vodičem, b – průchodem proudu, c – indukcí proudu: 1 – měřený objekt, 2 – pomocné jho)

2.2.10 Kombinované magnetování

Kombinované magnetování spočívá v současném použití podélného a příčného magnetování s rozdílným časovým průběhem magnetických polí. Výsledné pole je dáno vektorovým součtem jejich intenzit a lze ho získat skládáním střídavého a stejnosměrného magnetického pole, skládáním dvou střídavých polí s fázovým posuvem. Při kombinaci dvou polí se používá posun o 120° a u více polí posun v rozmezí 50° až 130° .



Obr. 11 Kombinované magnetování (a – skládáním střídavého a stejnosměrného magnetického pole, b – skládáním dvou střídavých polí s fázovým posuvem, c – ruční magnetování desky průchodem proudu)

2.2.11 Magnetovací elektrický proud

Elektrický proud pro buzení magnetického pole v magnetické defektoskopii je v rozsahu od 100 A do 10000 A [6],[12]. Dle časového průběhu se používá magnetovací proud stejnosměrný, střídavý, dvoucestně usměrněný, jednocestně usměrněný, impulzní periodický, impulzní jednorázový.

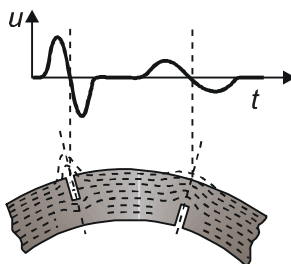
Napájení stejnosměrným proudem je možné buď z baterie nebo z generátoru. Výhodou stejnosměrného magnetického pole je detekce podpovrchových vad v největší možné hloubce. Nevýhodou je robustní zdroj a náročné odmagnetování zcela zmagnetovaného tělesa po ukončení měření.

Pro napájení střídavým proudem je nejčastěji používaná frekvence 50 Hz. Při této frekvenci je ještě poměrně slabý elektrický a magnetický povrchový jev (skinefekt), který však omezí lokalizaci hlouběji umístěné vady a navíc dochází k oteplení tělesa. Naopak se zvýší citlivost metody pro detekci povrchových vad a oproti jiným způsobům napájení je snadnější následné odmagnetování tělesa. Na trhu jsou také generátory s frekvencí napájecího proudu 3 kHz.

Jednocestně usměrněný proud ze střídavého jednofázového zdroje detekuje hlubší povrchové vady. Hodnota jednofázového proudu je obvykle limitována a proto se obvykle používá jen u přenosných zařízení.

Dvoufázové usměrnění ze střídavého jednofázového zdroje poskytuje oproti jednofázovému usměrnění větší hustotu proudu a hlubší průnik pole do materiálu.

Třífázové usměrněný proud je výhodný z hlediska vyváženého zatížení sítě. Impulzní napájení je výhodné u materiálu s větší hodnotou remanence, neboť lze provést diagnostiku po vybuzení impulzem na základě zbytkového magnetického pole. Výhodou je možnost použití vysoké maximální hodnoty proudu (10 kA) bez nebezpečí ohřátí objektu. Hloubka detekce je menší než u jednocestného usměrnění. Při impulzní magnetizaci lze s určitou nejistotou rozpoznávat vady na vnějším a vady na vnitřním povrchu trubky. Napětový impuls nad vadou na vnějším povrchu je vyšší a užší a obsahuje vyšší frekvenční složky oproti impulsu od vnitřní vady, který je širší a nižší. Filtrací signálu horní propustí se signál od vnitřní vady dále zeslabí a následným prahováním signálu lze vady rozlišit.



Obr. 12 Signál při vnější a vnitřní vadě

Potřebnou hodnotu intenzity magnetického pole pro různé objekty (2 až 6 kA·m⁻¹) lze pouze přibližně vypočítat jen pro cirkulární pole. Vhodnější než výpočty je použití speciálních měrek, které se přikládají na zmagnetovaný objekt (např. Bertholdova měrka dle Obr. 13 indikující směr magnetizace, možnou hloubku podpovrchové vady a kvalitu fluorescenční suspenze nebo třináctidílná klínová měrka), dále různých

kontrolních vzorků s umělými vadami a různých magnetometrů a indikátorů intenzity magnetického pole.

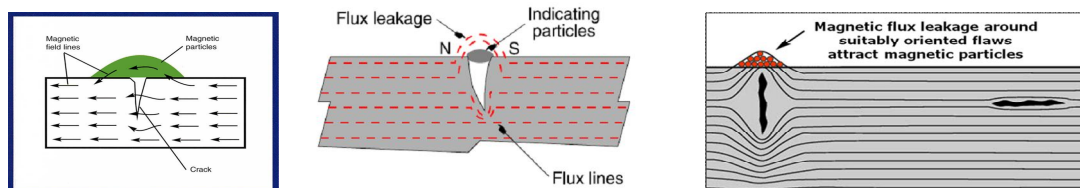


Obr. 13 Bertholdova měrka simulující trhliny

Po ukončení zkoušky je nutno provést demagnetizaci testovaného dílu a to vložení tělesa do magnetického pole opačné polaroty než je pole zbytkové dané remanencí, pomalým protažením tělesa cívkou napájenou střídavým proudem nebo vložení tělesa do cívky s následným snižováním magnetizačního proudu až na nulovou hodnotu.

2.2.12 Zviditelnění rozptylových polí

Zviditelnění rozptylových polí je založeno na pokrytí tělesa barevným nebo fluorescenčním feromagnetickým práškem (čisté železo, oxidy železa aj.). Pokrytí práškem lze provést suchou metodou s ručním nebo elektrostatickým naprašováním (zrna od 40 do 400 μm) a nebo mokrou metodou (zrna od 1 do 40 μm) s poléváním, nástřikem ze spreje, stříkací pistolí nebo ponořením do suspenze prášku v oleji, vodě nebo jiné kapalině. V místě vady je nad objektem rozptylové magnetické pole a na částice prášku působí síla, jež je přitahuje na místo největší koncentrace siločar (Obr. 14).



Obr. 14 Feromagnetické částice v magnetickém poli při vadě v materiálu

Obvykle se používá metoda mokrá – polévací, která je méně citlivá na podpovrchové vady, ale vlivem velké pohyblivosti částic a povrchového napětí suspenze zajišťuje precizní zobrazení i velmi malých povrchových necelistvostí. Indikace vad se vyhodnocuje vhodným osvětlením povrchu tělesa pokud možno rozptýleným světlem. Při použití fluorescenční suspenze se osvětlení obvykle realizuje zdrojem monochromatického ultrafialového UV-A záření 365 nm, neboť magnetická fluorescenční suspenze při dopadu tohoto záření zřetelně fluoreskuje. Archivace obrazu se provádí fotograficky a dnes již prostřednictvím digitálních fotoaparátů a kamer. Digitální záznam defektu umožňuje následné zpracování signálu na počítači, a tím získání mnohem dokonalejšího zobrazení.

3. Popis testovací linky

V této kapitole je uveden základní popis testovací linky, která byla navržena pro detekci povrchových a podpovrchových vad na železničních kolech. Návrh dílčích testovacích linek byl odvozen od základních požadavků na testování a také s ohledem na teoretické znalosti a praktické možnosti jednotlivých metod nedestruktivního testování materiálů.

3.1 Návrh testovací linky

Testovací linka byla účelově navržena na základě základních požadavků. Tyto požadavky jsou následující:

1. Komplexní testovací linka zaměřená na detekci povrchových a podpovrchových vad nacházejících se v železničních kolech
2. Systém pro mytí a čištění železničních kol
3. Nedestruktivní testování železničních kol – detekce, lokalizace a klasifikace podpovrchových vad
4. Nedestruktivní testování železničních kol - detekce, lokalizace a klasifikace povrchových vad – detekce vad v minimální délce 2 mm
5. Navržený testovací systém musí být součástí stávajícího výrobního procesu v uspořádání, které má zákazník zavedené
6. Systém, který umožňuje testovat železniční kola, musí splňovat příslušné lokální normy (stát Kazachstán)
7. Rychlost testování do cca 12 min./železniční kolo
8. Flexibilita a univerzálnost testovacích metod a systémů – možnost testovat železniční kola různých rozměrů a tvarů
9. Automatický systém pro značení detekovaných vad a export dat do databázových systémů

Na základě těchto požadavků probíhal nejprve návrh vhodných metod pro detekci a lokalizaci povrchových a podpovrchových vad. Vzhledem k obecným specifikacím bylo možné využít základních teoretických znalostí metod pro nedestruktivní testování, které se v současné době využívají. Požadavky byly rozděleny na dva dílčí body:

a) Detekce a lokalizace podpovrchových vad

Jako vhodné metody pro testování materiálů na podpovrchové vady je možné využít metody prozařovací a ultrazvukovou. Při výběru konkrétní metody musí být bráno v potaz prostředí a technické možnosti. V případě využití metody prozařovací by musel být výsledný testovací systém vybaven odpovídajícím rentgenovým systémem o dostatečném výkonu, který by byl schopen prozářit železniční kolo různých rozměrů a tvarů. Jako hlavní problém metody prozařovací je zdroj rentgenového záření, které se v okolí této metody nachází. Ultrazvuková metoda oproti tomu využívá ultrazvukových sond, které slouží k uvedení ultrazvukových vln do testovaného materiálu. Vzhledem k tomu, že se jedná o testování železničních kol, bylo by nutné využít více ultrazvukových sond, které jsou vhodně umístěné tak, aby byl otestován celý objem železničního kola. Mezi hlavní nevýhodu ultrazvukové

metody se řadí nutnost využití vazební tekutiny, která se musí nacházet mezi ultrazvukovou sondou a testovaným materiálem. Nicméně tato nevýhoda se dá vhodně vyřešit. Z důvodu teoretické i praktické znalosti metody ultrazvukového testování byla pro testování železničních kol s cílem detekce a lokalizace podpovrchových vad využita **metoda ultrazvuková**.

b) Detekce a lokalizace povrchových vad

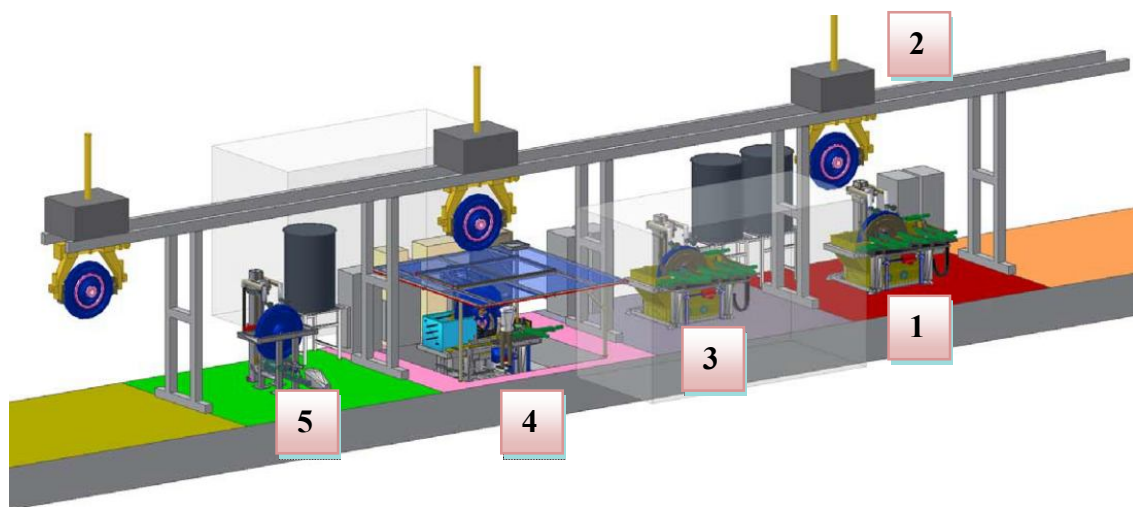
Zde je oproti detekci podpovrchových vad daleko větší možnost ve využití různých diagnostických metod. V tomto případě se tedy nabízí využití následujících metod: magnetická, kapilární, vizuální, vířivé proudy a infračervená. Jednotlivé výhody a nevýhody těchto metod jsou základně popsány v kapitole druhé. Nicméně pokud se podrobněji zaměříme na tyto metody, tak je patrné, že metoda magnetická v podstatě sdružuje metody kapilární, vizuální a vířivé proudy. Jinak je to ovšem u metody infračervené. Tato metoda nejčastěji využívá lokální ohřev testovaného materiálu aplikací vysokofrekvenčních elektrických polí. Lokální ohřev je pak testován využitím infračervených kamer, které snímají teplotní profil lokálně ohřátého místa v objektu. Vyhodnocován je pak právě tento teplotní profil. Bohužel nevýhodou této metody je právě již zmíněný lokální ohřev. Druhá metoda, která by mohla být využitelná, je právě metoda magnetická. Jak již bylo zmíněno, tato metoda sdružuje metody kapilární, vířivých proudů a vizuální. Pokud se prakticky zaměříme na tuto metodu, můžeme využití metody popsat následovně. V prvním kroku testování je nutné vhodně zmagnetovat testovaný objekt. Toto se provede tak, že se železniční kolo vloží do prostoru cívky, kterou protéká dostatečně velký střídavý elektrický proud. Důležitým bodem je to, že cívka musí být vhodně navržena a její uspořádání musí být vytvořeno tak, aby bylo možné detekovat vady v odpovídajícím směru. Během magnetování testovaného objektu je nutné železniční kolo polévat fluorescenční kapalinou (v podstatě kapilární metoda), která obsahuje feromagnetická tělíska. Právě aplikací střídavého magnetického pole (generovaného použitou cívkou) dojde k tomu, že se feromagnetická tělíska soustředí v místě, kde se nachází povrchová nebo mírně podpovrchová vada (v podstatě metoda vířivých proudů). Následně se využívá vhodných zdrojů ultrafialového záření, které zviditelní fluorescenční kapalinu se soustředěným místem feromagnetických částic a vizuálně je tak možné detekovat vadu (v podstatě metoda vizuální). Jednou z nevýhod této metody je nutnost demagnetizace testovaného objektu a přítomnost osoby, která provede vizuální kontrolu povrchu železničního kola. I přes zmíněné nevýhody, a právě díky kompaktnosti a komplexnosti magnetické metody, byla pro testování železničních kol na povrchové vady využita **metoda magnetická**.

V následujícím textu je popsána celá testovací linka, která využívá vybraných metod nedestruktivního testování. Je nutné podotknout, že testovací linka představuje komplexní průmyslový systém, který je nutné procesně řídit a to prostřednictvím vhodně zvoleného průmyslového řídicího systému. Popis návrhu a funkce průmyslového systému je detailně popsán v následujících kapitolách. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé části komplexní testovací linky.

3.2 Uspořádání testovací linky

Z předchozího obecného popisu vyplývá, že dle zadaných parametrů a požadavků musí testovací linka obsahovat následující části: ultrazvuková myčka, dopravníky, systém pro testování železničních kol na podpovrchové vady, systém pro

testování železničních kol na povrchové vady, výstupní vozíky a manipulátory. Celý návrh testovací linky byl proveden za spolupráce konstruktérů, odborníků z oblasti nedestruktivního testování a řízení průmyslových systémů. Výsledná linka je zobrazena na následujícím obr. 15.



Obr. 15 3D vizualizace defektoskopické linky – 1 - ultrazvuková myčka, 2 - manipulátory, 3 - systém pro testování železničních kol na podpovrchové vady, 4 - systém na testování železničních kol na povrchové vady, 5 - tvrdoměr

Jak je patrné z obr. 15, linka obsahuje všechny zmíněné součásti a komponenty. Testovací defektoskopická linka byla navržena s ohledem na řízení procesů, které byly zavedeny ve výrobním závodě železničních kol. Hlavním předpokladem bylo to, že vyrobená železniční kola byla dodávána přímo z výrobního procesu a proto přicházela v tzv. „surovém stavu“ ihned po konečném opracování. Železniční kola byla podávána prostřednictvím manipulátorů (obr. 15, část 2). Manipulátory tedy sloužily pro uvádění železničních kol do prostoru testovací linky. Vzhledem k tomu, že první testovací linkou byla linka pro ultrazvukové testování železničních kol, kdy docházelo k bezprostřednímu kontaktu (skrze vazební kapalinu) navržených ultrazvukových sond s povrchem testovaného železničního kola, bylo nutné nejprve povrch železničního kola vhodně očistit. K tomuto byla určena ultrazvuková čistička (obr. 15, část 1). Železniční kolo bylo následně prostřednictvím dopravníku předáno do první ultrazvukové linky a po otestování bylo opět pomocí manipulátorů vyjmuto a předáno do další linky, kterou byla linka využívající magnetickou práškovou metodu. Zde se železniční kola testovala na povrchové vady. Po otestování železničního kola na povrchové vady bylo testované železniční kolo předáno do systému určeného pro testování tvrdosti (tento systém není předmětem této diplomové práce a proto bude v dalším popisu vynechán).

Z uvedeného přehledu je patrné, že proces testování železničních kol byl relativně komplexní a vzhledem k robustnosti systému bylo nutné dodržet přesné technologické i procesní postupy. Především bylo nutné řídit předávání jednotlivých železničních kol tak, aby v jeden okamžik byly využity obě testovací linky a aby nedošlo k narušení systému předávání železničních kol nebo dokonce k nevhodnému uvedení železničních kol do prostoru konkrétní testovací linky.

3.2.1 Vstupní část – tryskač

Kola jsou před vstupem do měřicí defektoskopické linky tryskána metáním železných nebo umělohmotných broků na jejich povrch. Výstup tryskače (viz obr. 16) tedy musí být kompatibilní s navrženým manipulátorem, aby bylo zavážení kol co nejefektivnější.



Obr. 16 Tryskač

3.2.2 Vstupní dopravníky

Vstupní dopravníky (viz obr. 17) se nachází hned za tryskačem. Jejich hlavní funkcí je zavážení železničních kol do linky. Dále slouží i jako prostor pro odložení kola při zaplnění testovací linky. Dva dopravníky nesou etalony, které tak mohou být v případě potřeby kdykoliv zavezeny do příslušné testovací linky.



Obr. 17 Dopravníky (dole) a manipulátory (nahore)

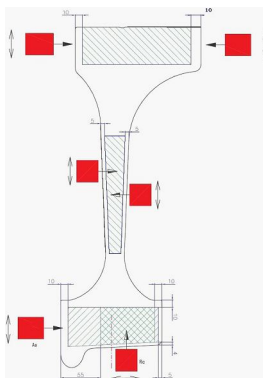
3.2.3 Ultrazvukové testování

Jak již bylo několikrát uváděno, ultrazvuková defektoskopie slouží pro nedestruktivní testování objektů s cílem detekce a lokalizace podpovrchových vad v testovaných materiálech. Tato metoda využívá uvádění ultrazvukových signálů do objemu testovaného materiálu. Ultrazvukové signály jsou uváděny prostřednictvím vhodných ultrazvukových sond, které jsou v kontaktu s povrchem testovaného materiálu a to prostřednictvím vazební kapaliny (s ohledem na akustickou impedanci a dobré přenosové vlastnosti ultrazvukových vln). Ultrazvukové vlny se šíří testovaným materiálem a odrážejí se od struktury materiálu, nehomogenit a rozhraní (rozdílné akustické impedance). Odražené ultrazvukové vlny, transformované na elektrické signály, jsou opět prostřednictvím ultrazvukových sond snímány a pomocí ultrazvukového systému vyhodnocovány. Obálku ultrazvukových signálů pak

reprezentují ultrazvuková echa, která charakterizují strukturu testovaného signálu. Ultrazvuková echa, která přesahují určitou amplitudu signálu, jsou vyhodnocena jako echa vadová reprezentující vady (defekty) nacházející se ve vnitřní struktuře testovaného materiálu. Tohoto principu je tedy využíváno při testování železničních kol pomocí ultrazvukové testovací linky.

Vzhledem k tomu, že jsou testována železniční kola, je hlavním úkolem volba vhodných ultrazvukových sond. Jak je patrné, železniční kola nejsou ploché disky, ale disky s různými geometrickými tvary (záhyby). Toto je nutné respektovat a uvažovat při výběru ultrazvukových sond. Ultrazvukové sondy je nutné vhodně rozmístit tak, aby byl otestován celý objem ultrazvukového kola. Z tohoto důvodu mohou být pro testování využity jak přímé, tak úhlové ultrazvukové sondy. Vzhledem k tomu, že jsou pro testování využity metody dvojité, je pro princip testování využita metoda impulsová odrazová.

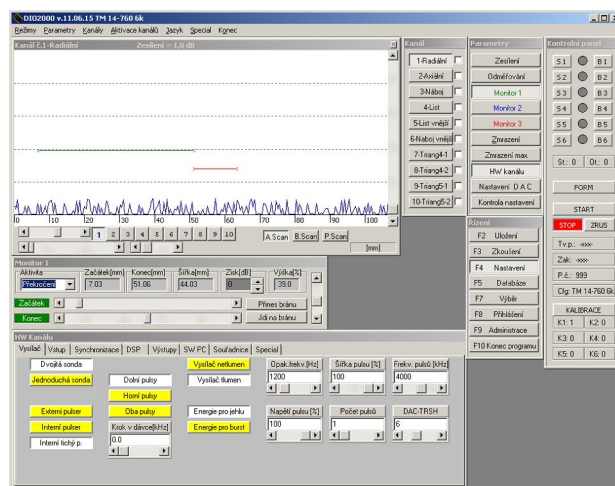
Testovací linka byla navržena pro zjišťování vad v železničních kolech, zejména v oblasti náboje, listu a věnce – v radiálním i axiálním směru, a to tak, aby bylo možné zjišťovat vnitřní vady s FBH ≥ 1 mm již od hloubky 5 mm pod povrchem. Základem zařízení je 4-kanálový elektronický systém DIO 2000, s možností rozšíření a doplnění o další UZ kanály – viz Obr. 18.



Obr. 18 Označení testovacích zón a rozmístění ultrazvukových sond

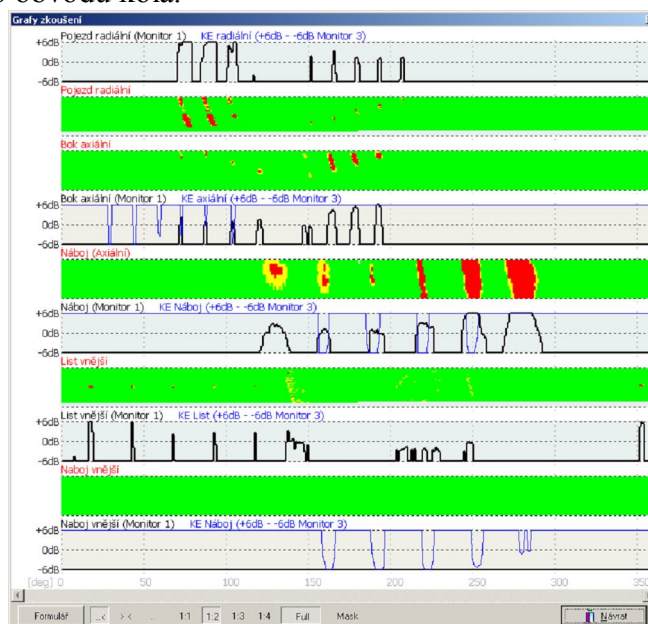
Rozsahy testování jednotlivých zón pro různé typy a velikosti kol (průměr železničních kol od 600 do 1300 mm) se nastavují programově, včetně imersního skenování tvarově složitých disků s automatickým sledováním zakřivených ploch a udržováním konstantní vzdálenosti sondy od povrchu.

Ultrazvukové signály zaznamenané jednotlivými sondami byly zpracovávány využitím ultrazvukového systému DIO2000 (vyvinutého společností STARMANS electronics s.r.o. – www.starmans.cz). Řídící a vyhodnocovací software DIO 2000 (Obr. 19) umožňuje nastavovat všechny potřebné parametry testování pro každý kanál individuálně, s možností ukládání libovolného počtu konfigurací.



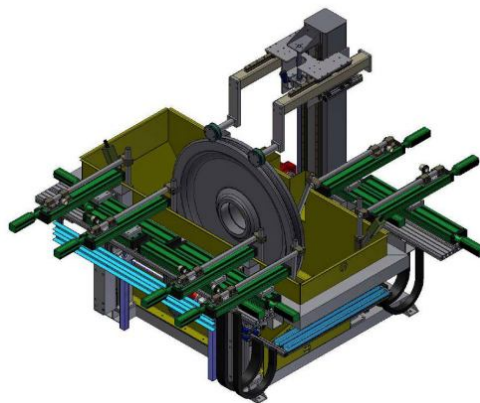
Obr. 19 Pracovní prostředí software ultrazvukového systému DIO2000

Systém dosahuje odstupu signálu od šumu min. 15 dB (echo od vývrtu 1 mm FBH v oblasti věnce kola). Při zkoušení železničních kol je možné využít funkce digitálního zpracování signálu, např. průměrování nebo statistického zpracování signálů. Záznam výsledků kontroly je uložen do databáze. Identifikační údaje o zkoušeném kole se do databáze přebírají automaticky z centrálního informačního systému provozu, s možností doplnění ve vstupním formuláři. Grafický záznam o zkoušení každého kola (Obr. 20) se vytváří na základě dat, ukládaných do databáze, a znázorňuje maximální amplitudy zaregistrovaných indikací ze všech kanálů a relativní polohu indikací po obvodu kola.



Obr. 20 Pracovní prostředí software ultrazvukového systému DIO2000

Takto navržený ultrazvukový systém byl implementován do testovací linky, která dokázala nést celé ultrazvukové kolo a zajišťovala celý proces testování železničního kola. Prakticky se jednalo o založení testovaného kola do prostoru ultrazvukové linky, přiložení jednotlivých ultrazvukových sond (viz obr. 18) na povrch testovaného kola v imersním prostředí, otáčení železničního kola a synchronizovaný záznam ultrazvukových signálů.



Obr. 21 Defektoskopická linka využívající ultrazvukové testování železničních kol

Zpracování dat z daného železničního kola zajišťoval software DIO2000, který současně ukládat vyhodnocená data do příslušné SQL databáze. Tímto bylo dosaženo přesného záznamu ke každému testovanému kolu.

3D zobrazení ultrazvukové linky se nachází v obr. 21. Zde je možné pozorovat, že železniční kolo je upnuto v otočných nosnících, které zajišťují otáčení železničního kola. Po upevnění železničního kola do otočných nosníků dojde k přitlačení ultrazvukových sond na povrch testovaného kola a následně otáčení železničního kola. Testování je prováděno v imersním prostředí, je tedy zaručena akustická vazba. Během otáčení železničního kola jsou prostřednictvím ultrazvukových sond prováděny záznamy ultrazvukových signálů. Po otočení železničního kola o celý obvod (min. o 360°) jsou následně ultrazvukové sondy otaženy z povrchu železničního kola a kolo je pomocí manipulátorů vyjmuto z prostoru ultrazvukové testovací linky. Jak je patrné, je proces testování železničního kola relativně složitý a vyžaduje návaznost mnoha procesů řízení. Implementace procesů může být bodově uvedena:

- Založení železničního kola do ultrazvukové linky
- Přiložení ultrazvukových sond na povrch železničního kola v imersním prostředí
- Zahájení procesu skenování povrchu železničního kola pomocí ultrazvukových sond během otáčení železničního kola
- Oddálení ultrazvukových sond od povrchu železničního kola
- Přivolání manipulátorů a vyjmutí železničního kola z prostoru ultrazvukové linky.

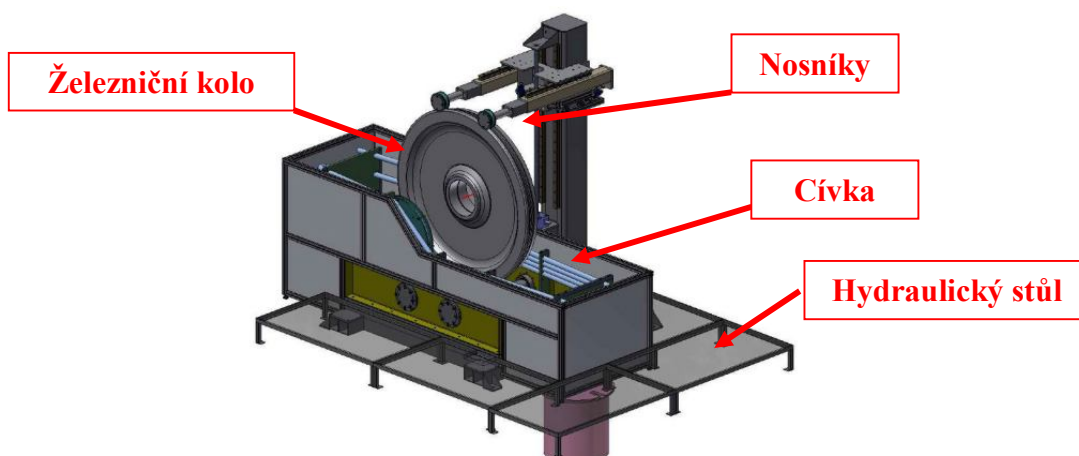
Po otestování celého obvodu železničního kola a vyhodnocení, bylo toto kolo prostřednictvím manipulátorů uvedeno do další testovací linky, která využívala magnetické práškové metody.

3.2.4 Testování pomocí magnetické práškové metody

Automatická linka využívající magnetické zkoušení železničních kol je určena pro detekci a lokalizaci povrchových vad. Hlavním zařízením automatické linky je cívka, která slouží pro magnetizaci testovaných železničních kol, která jsou během procesu magnetizace polévána kapalinou obsahující fluorescenční prášek s feromagnetickými tělísky. Vlivem magnetizace dojde díky rozptylového magnetického pole k uspořádání feromagnetických tělísek a to především v místech, kde se nachází povrchová trhlinka v materiálu. Po magnetování a současném polévání je testované

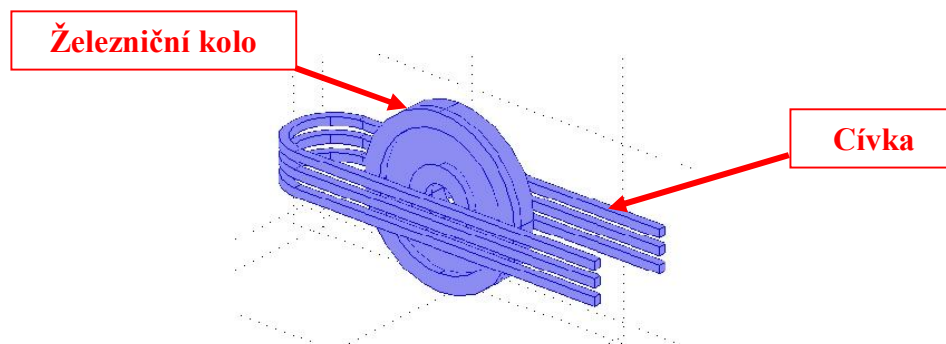
železniční kolo osvětlené prostřednictvím zdrojů ultrafialového (UV – Ultra Violet) záření. Využitím těchto zdrojů světla dojde ke zvýraznění míst, kde jsou soustředěna feromagnetická tělíska a kde se nacházejí povrchové vady nebo trhliny. Pokud se pak povrch testovaného objektu vhodně osvítil, jsou místa obsahující vady zvýrazněna a obsluha testovací linky pak může relativně snadno detekovat a lokalizovat vadu. Po otestování celého povrchu měřeného objektu je nutné železniční kolo odmagnetovat. Po demagnetizaci železničního kola je proces testování dokončen. Takto popsany princip testování objektů prostřednictvím magnetické práškové metody se v průmyslových aplikacích nejčastěji využívá. Pojďme se ovšem zaměřit na testování železničních kol, kdy využití magnetické práškové metody je díky geometrii železničního kola podstatně složitější.

V případě testování železničních kol je postup následující. V předchozí kapitole bylo popsáno, že železniční kola jsou nejprve ultrazvukově čištěna a následně testována na podpovrchové vady využitím ultrazvukové defektoskopie. Předávání železničních kol mezi jednotlivými dílčími systémy je prováděno pomocí manipulátorů. Využitím těchto manipulátorů jsou tedy železniční kola uváděna do prostoru testovací linky využívající magnetickou práškovou metodu. 3D zobrazení této defektoskopické linky je uvedeno na obr. 22. V dalším textu bude pro jednoduchost testovací linka využívající magnetickou práškovou metodu označena jako „magnetická linka“.



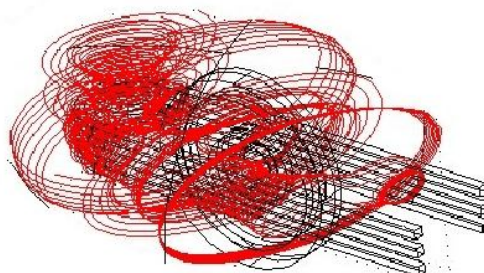
Obr. 22 Defektoskopická linka využívající magnetické testování železničních kol

Železniční kolo je do magnetické linky vloženo do nosníků, které zajišťují otáčení železničního kola s různou, volitelnou, rychlostí. Po vložení železničního kola je kolo upnuto do těchto nosníků. Ihned po pevném vložení železničního kola a upnutí do nosníků dojde k otáčení železničního kola a magnetizaci prostřednictvím cívky, kterou je protékán střídavý elektrický proud. Tento elektrický proud vlivem vodiče (železničního kola), nacházejícího se v prostoru cívky indukuje rozptylový magnetický tok. Během magnetování železničního kola je testované kolo současně poléváno fluorescenční kapalinou obsahující feromagnetická tělíska. Díky magnetování železničního kola a vzniku rozptylového magnetického pole dojde k uspořádání feromagnetických tělísek, která jsou soustředěna v místech, kde se nacházejí povrchové nebo těsně podpovrchové trhliny. Magnetizace železničního kola a vznik rozptylového magnetického toku ovšem závisí na uspořádání a počtu závitů cívky. V uvedené aplikaci byl před samotnou realizací testovací linky proveden návrh uspořádání magnetovací cívky v programu COMSOL. Návrh je zobrazen na obr. 23.



Obr. 23 Uspořádání magnetovací cívky

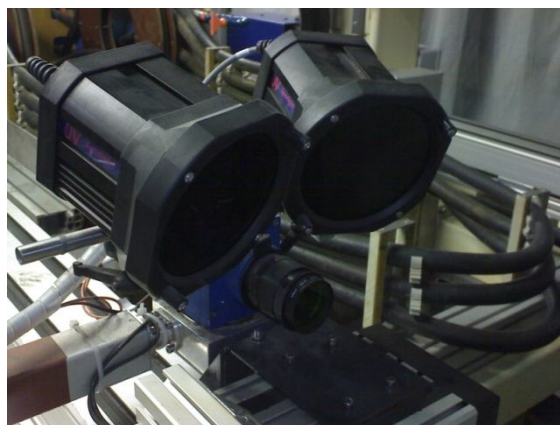
Následně bylo pomocí simulace v prostředí s definovanou permitivitou a materiálu s definovanou permeabilitou provedeno zobrazení magnetického toku. Zobrazení bylo důležité z důvodu pokrytí celého železničního kola (Simulace byla navržena na základě přesně stanovených parametrů s uvažováním největšího železničního kola. Návrh je duševním vlastnictvím společnosti STARMANS electronics s r.o.). Simulace je zobrazena na obr. 24.



Obr. 24 Simulace průběhu magnetického toku

Jak je patrné z obr. 24, magnetický tok má rozmanitý charakter a magnetické indukční čáry jsou kolmé k povrchu železničního kola. Nejvyšší účinek magnetického toku je v místě ohybu cívky. Takové uspořádání cívky má dostatečný vliv na generování rozptylového magnetického pole a zmagnetování železničního kola.

Po zmagnetování železničního kola a soustředění feromagnetických tělísek v oblastech obsahující trhliny je nutné provést vizuální kontrolu povrchu. Vzhledem k tomu, že se jedná o automatickou linku, bylo pro testování povrchu železničního kola využito unikátního přístupu prostřednictvím vysokorychlostních CCD kamer. Pro testování byly využity dvě CCD kamery. Každá kamera skenovala jednu stranu železničního kola. Kamery byly nastaveny tak, aby prováděly skenování celého povrchu železničního kola. Před testováním železničního kola byla stanovena trajektorie testování železničního kola dle ohniskové vzdálenosti kamer. Součástí kamer bylo integrované osvětlení obsahující zdroj ultrafialového světla. Kamery společně s integrovaným ultrafialovým zdrojem světla jsou zobrazeny na obr. 25.

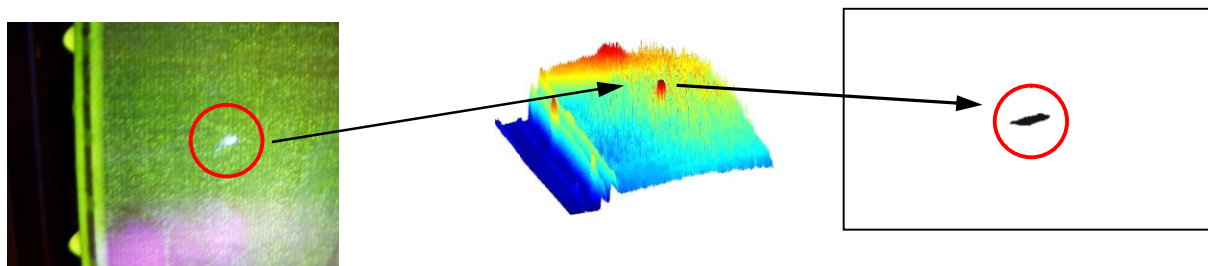


Obr. 25 Kamera s UV lampami

Takto vytvořené kamery byly připevněny na hydraulický stůl a v průběhu testování bylo možné jednak otáčet kamerami v souřadnicích dle osy x a jednak měnit výškovou pozici kamer v souřadnicích dle osy y. Tento princip zajišťoval možnost skenování železničního kola v co nejkratším čase. CCD kamery prováděly záznam signálů a obrazů, které byly zasílány do PC, které obsahovalo vyhodnocovací software. Zaznamenaný obraz je tedy přenášán do vyhodnocovacího pracoviště, kde je dále podroben číslcovému zpracování a vyhodnocení. Aby proces detekce vad byl přesný a spolehlivý, byl v softwarovém modulu implementován algoritmus zajišťující spolehlivou detekci vad a trhlin nacházejících se na povrchu železničního kola. Navržené metody zpracování obrazu jsou implementované v mikroprocesoru vysokorychlostní CCD kamery, která byla plně vyvinuta firmou STARMANS electronics s.r.o. Během testování, kdy je skenovaný celý povrch železničních kol, pomocí vysokorychlostních kamer jsou zaznamenávány snímky, které jsou následně vyhodnocovány využitím navržených algoritmů zpracování obrazu.

Obecně je možné navržený algoritmus popsat ve třech fázích (viz obr. 26):

a) Potlačení šumu - Zaznamenané snímky obsahují amplitudy signálu, který je zarušen šumem. Tyto amplitudy jsou účinně potlačovány aplikací metody prostorového průměrování.

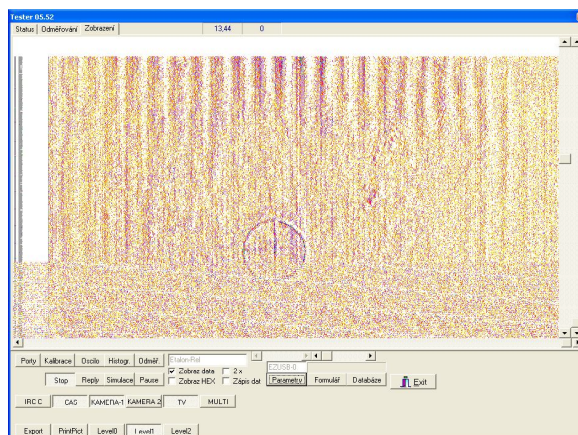


Obr. 26 Princip detekce vady – implementovaný algoritmus

b) Detekce vad - Během fáze detekce vad musejí být rozlišeny nežádoucí artefakty od vad, které musejí být jednoznačně určeny. Během popsaných kroků potlačení šumu a detekce vad byly vybrány testované algoritmy, které svou jednoduchostí nezatěžují výkon použitých mikroprocesorů integrovaných v digitálních kamerách. Tyto algoritmy jsou ovšem velice účinné. Snímky jsou zpracovány v on-line režimu, již v průběhu testování železničních kol.

c) Klasifikace vad - Většina defektů detekovaných na železničních kolech má tvar přímky. Využitím algoritmů pro klasifikaci vad je možné určit tvar detekovaných útvarů. Tím je detekce vad plně automatizovaná.

Zaznamenané signály a obrazy jsou nejprve zobrazeny v operátorském pracovišti obsahující počítač, který má instalovaný software nazvaný DIO5000. Základní obrazovka software se zobrazeným záznamem je zobrazen na obr. 27.



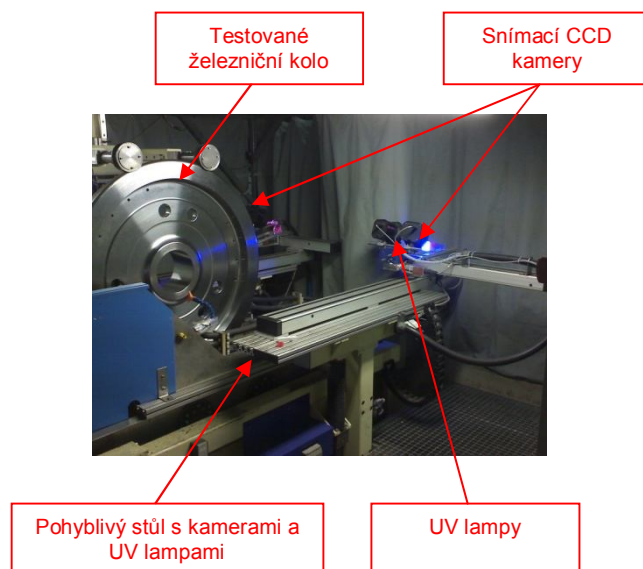
Obr. 27 Program se zobrazením zaznamenaných signálů (zobrazení kontrolní měřky – obr. 13)

V případě, že je dle implementovaného algoritmu, detekována vada, dojde k automatickému uložení dat do databáze a indikaci, že železniční kolo obsahuje povrchovou vadu. Po dokončení skenování železničního kola pomocí CCD kamer je zahájen proces demagnetování železničního kola.

Vzhledem ke složitosti celého procesu testování železničního kola pomocí magnetické práškové metody, jsou všechny úkony testování automaticky řízené a zdokumentované. Jak je patrné, je testovací proces relativně složitý a jednotlivé úkony a procesy testování musí na sebe navazovat. Je nutné podotknout, že celý proces testování železničního kola pomocí magnetické linky musí být kratší než 3 minuty. Je tedy nutné jednotlivé procesy ovládat synchronizovaně a dle přesně nastaveného časování. V rámci magnetické linky je nutné řídit následující procesy:

- Založení železničního kola do magnetické linky
- Spuštění magnetování železničního kola (uvedené magnetovacího proudu do cívky)
- Spuštění polévání kola fluorescenční kapalinou
- Nastavení hydraulického stolu na testovací pozici
- Zahájení procesu skenování povrchu železničního kola pomocí dvou CCD kamer (dodržení trajektorie dle testovaného železničního kola)
- Zaparkování CCD kamer na výchozí pozici
- Spuštění procesu demagnetování železničního kola (uvedení demagnetovacího proudu)
- Přivolání manipulátorů a vyjmutí železničního kola z prostoru magnetické linky

Celý proces testování železničních kol může být prováděn manuálně, poloautomaticky nebo automaticky. Praktická realizace magnetické linky je zobrazena na obr. 28.



Obr. 28 Realizovaná magnetická linka (proces po dokončení testování)

Po dokončení procesu testování bylo testované kolo vyjmuto z magnetické linky a předáno prostřednictvím manipulátorů do další části výrobního procesu. Jak je patrné z uvedeného popisu, je magnetická linka relativně složité zařízení na řízení procesů. V následující kapitole (Kapitola 4) je uveden návrh a realizace řídicího systému, který tuto linku přesně řídí.

3.2.5 Výstupní vozíky

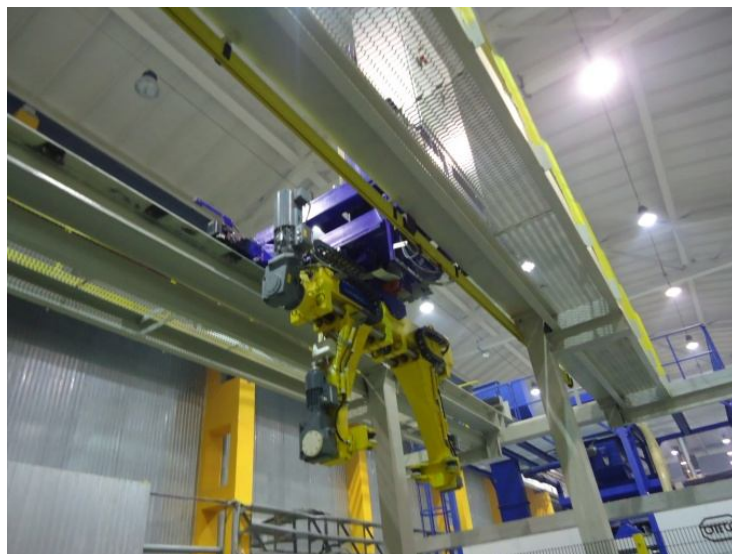
Výstupní vozíky slouží pro předávání železničních kol mezi jednotlivými fázemi výrobního procesu. Jedná se o vozíky, které obsahují vodící tyč, na kterou jsou vkládány vždy dva páry železničních kol. Manipulátor je zde pokládá do sloupců až o pěti kusech a v automatickém režimu je třídí podle výsledků měření.

3.2.6 Manipulátory

Pro manipulaci s testovanými železničními koly slouží kolejnicové stroje (manipulátory) umístěné na dráze nad linkou. Vzhledem k jejich robustnosti jsou schopny unést i více než tunové kolo a volnost pohybu v pěti osách umožňuje jejich pokládání a odebírání ze strojů různého charakteru. Všechny používané pohony jsou asynchronní a vzhledem k použitému typu řízení (servo) je nutné je chladit. To je zajištěno cizím chlazením nejpoužívanějších motorů (zdvihový a svěrový). Všechny motory jsou rovněž vybaveny elektromagnetickými brzdami.

Pohyb v horizontální ose je umožněn dvěma paralelně zapojenými motory o výkonu 4,3kW, ve vertikální je to motor 32,2 kW, svírací zajišťuje motor 4,3kW a dva motory, každý pro rotaci jedné z kleštin, o výkonu 1,6kW. Bližší specifikace jsou uvedeny dále v praktické části a jsou i částí konfigurace měničů v programu STARTER v příloženém projektu.

Jelikož jsou tyto manipulátory nasazeny již na více linkách, liší se podle typu kol vstupujících na linku. Pokud jsou kola již opracovaná a jejich rozměry jsou jen s nepatrnou chybou, jsou použity manipulátory bez laserového odměřování ve svíracích kleštinách (výšku pro odebírání je možné poměrně přesně vypočítat). Pro kola neopracovaná je výhodné umístit pod svírací kleštiny odměřovací lasery a při odebíracím cyklu jsou jimi skenována kola na štosu a vypočítána pozice, ve které je možné je bezpečně uchytit. Tento typ manipulátoru je výhodné použít na ještě neopracované typy kol, kde jsou velké tolerance odchylek rozměrů i kulatosti.



Obr. 29 Manipulátory

4. Decentralizovaný řídicí systém pro testovací linku

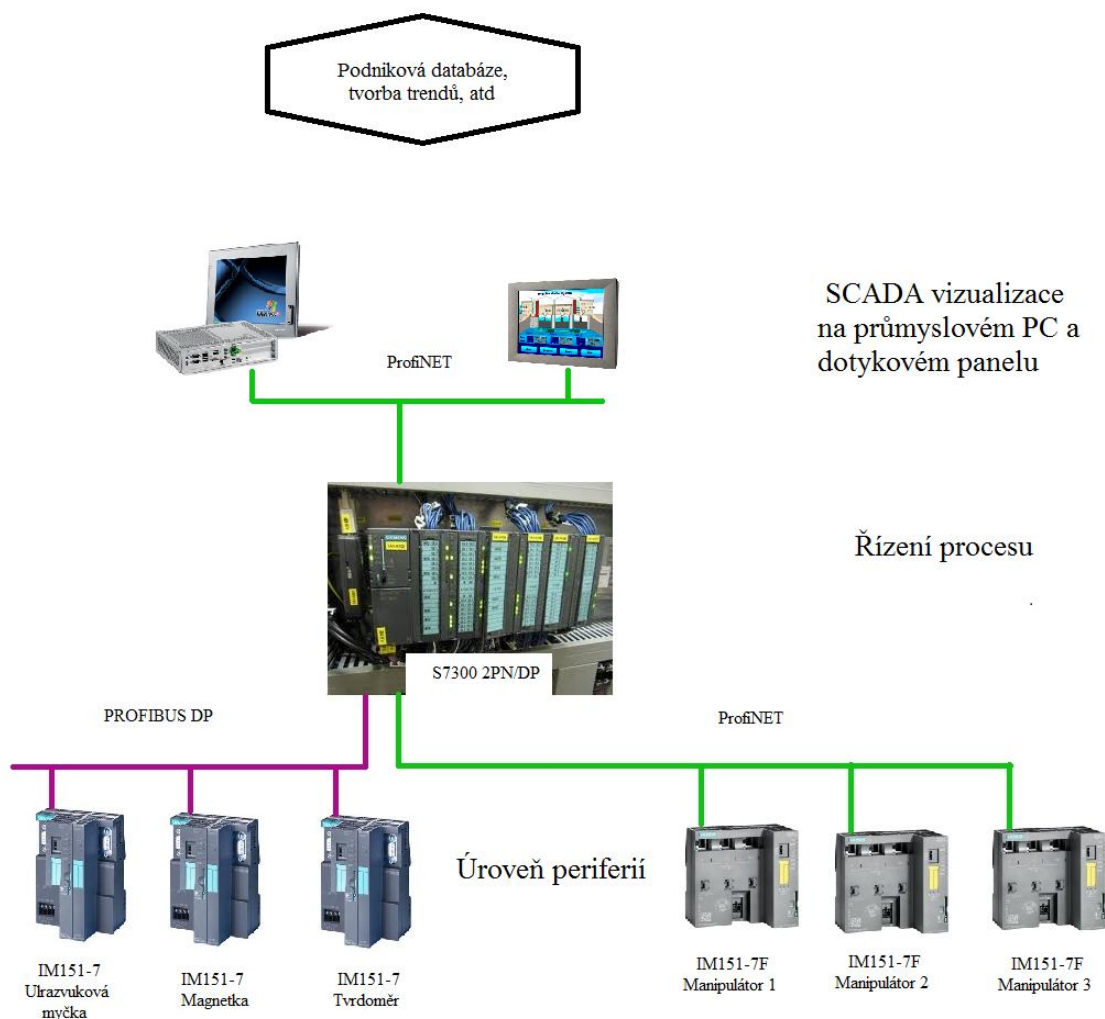
Pro řízení linky nedestruktivní defektoskopie bylo použito PLC Simatic firmy Siemens. Výběr řídicího systému byl proveden jednak vzhledem k žádosti zadavatele, který má s těmito systémy dobré zkušenosti, a jednak vzhledem k jejich stabilitě, výkonnosti, snadné diagnostice a propracovanému programovacímu jazyku [16], [17], [19]. Díky tomuto bude možné bezpečně řídit proces a zkrátí se čas potřebný k odladění programu.

Pro řízení pohonů jsou ve strojích defektoskopické kontroly použity měniče SINAMICS G120, jelikož zde není kladen příliš velký nárok na přesné polohování. Oproti tomu jsou v manipulátorech použity měniče řady S120, které umožňují ovládání asynchronních motorů v režimu servo, velké možnosti konfigurací polohování, ramp, řízení brzd, synchronizace současného chodu pohonů, atp., které jsou pro přesné řízení použity.

Jelikož je linka pro nedestruktivní testování železničních kol řízena decentralizovaně, je možné ji rozdělit do více úrovní. Každý řídicí systém na nižší úrovni předává do vrstev vyšších údaje o svém stavu a přebírá od nich řídicí signály, podle kterých je řízena celá defektoskopická linie. Jednotlivé úrovně se dají rozdělit následovně:

1. Úroveň akčních a měřících členů. Každá periferní stanice je vybavena modulem DP master, díky kterému mají na odděleném okruhu sítě PROFIBUS DP připojené jednotlivé měniče ovládající pohony, lineární enkodéry, pneumatické terminály FESTO, atd.
2. Úroveň periférií slouží k řízení pohonů, ošetření zakázaných stavů, základnímu polohování atd. pomocí periferních jednotek ET200 IM151-7(F). Každý ze strojů je pak dále opatřen funkcemi pro automatické vykonání měřícího cyklu (nezávisle na hlavním řídicím PLC) a funkce pro automatické vkládání (uchycení) a odebírání (uvolnění) měřeného kola manipulátorem. V případě manipulátorů jde i o vykonávání delších následností pohybů. Jelikož manipulátory komunikují bezdrátově, je třeba, aby zde bylo ošetření i případného zpoždění či výpadku spojení s řídicím PLC. Proto jsou zde všechny parametry pro série pohybů ověřovány zpětným přeposláním dat a dalšími zabezpečeními.
3. Úroveň řízení (ve smyslu globální logiky) defektoskopické linky. V PLC na této úrovni jsou shromažďována data z periferních jednotek pomocí protokolu PROFIBUS DP (z/do měřících strojů) i ProfiNET (bezdrátově z a do manipulátorů), tvořena interní databáze o pohybu a výsledcích měření železničních kol v lince a ovládání automatického režimu.
4. SCADA řízení z průmyslového počítače a dotykového panelu pomocí vizualizace ve WinCC flexible.
5. Shromažďování dat v podnikové databázi

Navržené řízení je patrné z následujícího obrázku.



Obr. 30 Blokové schéma SCADA systému

Jako hlavní prvek decentralizovaného řízení slouží jednotka S7300 2PN-DP umístěná v rozvaděčové skříni ultrazvukové linky. Komunikace s ostatními periferními jednotkami je využito jednak skrze rozhraní PROFIBUS DP (okruh řízení měřících strojů), tak i ProfiNet (použití bezdrátových klientů pro bezdrátovou komunikaci s manipulátory).

Síť PROFIBUS je na periferní úrovni zakončen aktivním zakončovacím odporem.

Jak už bylo uvedeno výše, každá stanice IM151-7(F) je vybavena modulem DP master pro oddělení sítí. Těmito opatřeními je docíleno toho, aby při poruše některého ze zařízení nemusela být odstavena celá testovací linka.

4.1 Akční a měřící členy

Jelikož není náplní této práce podrobnější popis měřících stanic, je zde přehled jejich měřících a akčních členů uveden jen stručně. Jedná se především o frekvenční měniče SINAMICS G120, které jsou určené pro ovládání asynchronních motorů rotování kola ve vaně, přítlaku kladek držení kola, čerpadel, vstupních a výstupních dopravníků, měřících stolic s ultrazvukovými sondami, tvrdoměrové stolice, atd. Pro odměřování jsou zde použity lineární absolutní enkodéry (zejména pro aktuální výšku

kladek a měřících stolů), ultrazvukové hladinoměry, indukční snímače, koncové spínače atd.

V manipulátorech jsou pak pohony všech os řízené frekvenčním měničem SINAMICS S120 a pro odměřování jsou zde mimo indukčních čidel a koncových spínačů, použity lineární i rotační absolutní enkodéry s SSI výstupem (pro řízení polohy), relativní A/B R rotační enkodéry (řízení otáček pohonů) a laserové absolutní odměřování, které je výhodné vzhledem k velké délce defektoskopické linie a jejich necitlivost k případným podkluzům pojezdových motorů po kolejnicích. Bližší specifikace těchto členů jsou uvedeny v praktické části.

4.2 Úroveň periferií

Jak bylo uvedeno výše, pro řízení měřících strojů jsou použity periferní jednotky SIMATIC ET200 IM151-7. Ty jsou mezi sebou propojeny sítí PROFIBUS DP (na komunikaci nejsou kladeny žádné speciální nároky), která je zakončená aktivními odpory. Ty jsou napájené z vlastního zdroje, a proto při selhání některého z koncových uzlů sítě nedojde k přerušení komunikace mezi uzly zbývajících.

Pro manipulátory jsou použity moduly s bezpečnostními funkcemi ET200 IM151-7F, které ale ještě v okamžiku odevzdávání této práce nebyli aktivní. Vzhledem k tomu, že komunikace probíhá bezdrátově prostřednictvím bezdrátových klientů a k tomu, že hlavní (řídící) CPU není taktéž typu F, bude použití těchto funkcí pravděpodobně omezené jen na PROFIsafe komunikaci s frekvenčními měniči a jeho bezpečností funkce (SBC, SS1, STO, atd.).

Pro linku s magnetickou defektoskopií je vzhledem k nutnosti oddělení transformátorů od ostatní elektroniky použito další periferní jednotky ET200 IM151-3, která slouží řízení magnetizačních proudů do cívek.

4.3 Řízení procesu

PLC na této úrovni je vzhledem ke kompatibilitě sítí ProfiNET a Ethernet, připojeno na počítačovou síť defektoskopické linky. Vzhledem k množství zpracovávaných dat a nárokům na připojení jak do nižších, tak do vyšších komunikačních vrstev, je použito PLC řady S7-300 2PN/DP (dále koncentrátor nebo hlavní PLC). To je umístěno v rozvaděčové skříni ultrazvukového měření a pro jeho maximální využití slouží taktéž k řízení výšky stolů s ultrazvukovými sondami, komunikaci s měřícím SW a HW DIO2000 firmy STARMANS, kontrole a napouštění vazebního prostředí (vody) a tak dále.

4.4 SCADA

Pro SCADA systém bylo na žádost zákazníka použito vizualizace pomocí WinCC flexible 2008. Vzhledem k rozsáhlosti linky, počtu monitorovaných vstupů i nárokům na úroveň řízení a sledování probíhajících procesů, bylo potřeba dokoupit licenci pro 4096 použitelných tagů. Tak bude možno přivést všechny důležité informace do operátorského velína a maximálně usnadněna diagnostika případných poruchových stavů.

WinCC flexible explicitně nenabízí možnost průběžného výstupu dat do databázového systému na nejvyšší (podnikové) úrovni. Toto omezení je odstraněno použitím skriptovacího jazyku Visual BASIC pro výstup do textového souboru a

softwarem firmy STARMANS, který tento soubor dále zpracovává a odesílá na SQL server.

4.5 Použitá programovací prostředí

Program pro PLC SIMATIC byl napsán v prostředí STEP7 v4.5 SP2 pomocí jazyku STL a v některých případech, vzhledem k větší vizuální přehlednosti, i LAD. Ke konfiguraci frekvenčních měničů je použito konfiguračního nástroje STARTER s software DriveES od firmy Siemens, který umožňuje vhodné propojení mezi těmito programy.

Vzhledem k tomu, že byla tato práce odevzdávána v čase, kdy probíhalo souběžné dokončování dvou měřících linek (v Kazachstánu a Ostravském Bontransu), kde se manipulátory a programy koncentrátoru nepatrně liší, jsou v praktické části projektu uvedeny obě dvě varianty řízení. Tyto rozdíly jsou způsobeny zasazením defektoskopické linky do výrobního procesu. Důvody pro úpravy řídicího programu jsou uvedeny v praktické části.

5. Realizace řídicího systému

V praktické části této diplomové práce bude věnována pozornost programování automatických manipulátorů, které slouží k přemísťování měřených objektů (v tomto případě železničních kol) v rámci testovací linky a jejich třídění podle výsledků testování. Tyto kolejnicové stroje jsou ovládány periferní jednotkou firmy SIEMENS IM150-8F. Data od každého z nich jsou koncentrována v hlavním řídicím PLC S7-300 2PN/DP, které pak řídí celé polohování, tvoří interní databázi o poloze vstupních objektů na lince a výsledcích měření, ovládá vstupní pásové dopravníky i hydraulické agregáty a řídí měřicí cykly jednotlivých strojů.

Vzhledem k velkému množství koncepcí těchto defektoskopických linek, je řídicí program navržen tak, aby jej bylo možné s jednoduchými úpravami používat na libovolně rozvržená zařízení. Logika na nejnižší a nejvyšší úrovni řízení se poté zachovává a je nutné doplnit pouze polohy strojů a pokládací či odebírací funkce (vzhledem k tomu, že každé zařízení může vyžadovat jiný postup při vkládání/odebírání kola).

Do cyklů řídicích automatický režim se poté přidá rozhodnutí, kdy bude dané zařízení použito a volání funkcí pro pokládání - odebírání při dosažení pozice nad daným strojem.

5.1 Popis programu manipulátoru

Program manipulátoru je tvořen tak, aby byl schopný pracovat v různých režimech (zpočátku 3, později na žádost zákazníka byl přidán režim čtvrtý – poloautomat):

- **SERVIS** – tento režim ovládání je možné používat k servisním účelům. Pohyb os manipulátoru je realizován pomocí „jogování“ a je omezen pouze na softwarově nastavené koncové polohy. V servisním režimu není možné používat funkcí využívajících momentové vazby do frekvenčních měničů (svírání a odkládání kola na dopravník).
- **MANUÁL** – V tomto režimu jsou pohony manipulátoru polohově ovládány pomocí frekvenčního měniče. Cílová pozice pro jednotlivé osy je určena absolutně a pohyb je podle parametrů, nastavených v DB pro parametry (rychlost, akcelerace, de-akcelerace, omezení, maximální moment).
- **POLOAUTOMAT** – Manipulátor vykonává automaticky sérii pohybů, které jsou rozděleny do čtyř kategorií: jízda na cílovou pozici (kdy přesně dosáhne pozice na jednotlivém stroji), odeber kolo, polož kolo (kdy podle pozice rozliší, jestli se vykoná cyklus pro položení/odebrání kola z dopravníku či některého ze strojů) a rotace o 90° (povolené jen na vhodných pozicích).
- **AUTOMAT** – Manipulátor je ovládán pomocí komunikačních datových bloků přes ProfiNet z koncentrátoru (S7-300) a je ovládán pomocí v něm naprogramovaného stavového automatu. Řídicí povely by se dali principiálně rozdělit na: jízda nad pozici, položení kola na dopravník, položení kola do stroje, odebrání kola z dopravníku a odebrání kola ze stroje.

Samotný program ovládající manipulátor je strukturován ve „vrstvách“, které na sebe postupně navazují. Nejnižší vrstvy slouží k samotné komunikaci s frekvenčním měničem SINAMICS S120, základním povelům pro motor (jogování, základní polohování, atd.). Vyšší vrstvy pak postupně tvoří logiku, která využívá nižších vrstev k vykonávání složitějších pohybů ve více osách, komunikaci s hlavním PLC S7-300,

parametrizaci těchto pohybů, zabezpečení jejich vykonávání a zabezpečení samotného manipulátoru vůči kolizím.

5.2 Komunikace s frekvenčními měniči a parametrizace pohonů

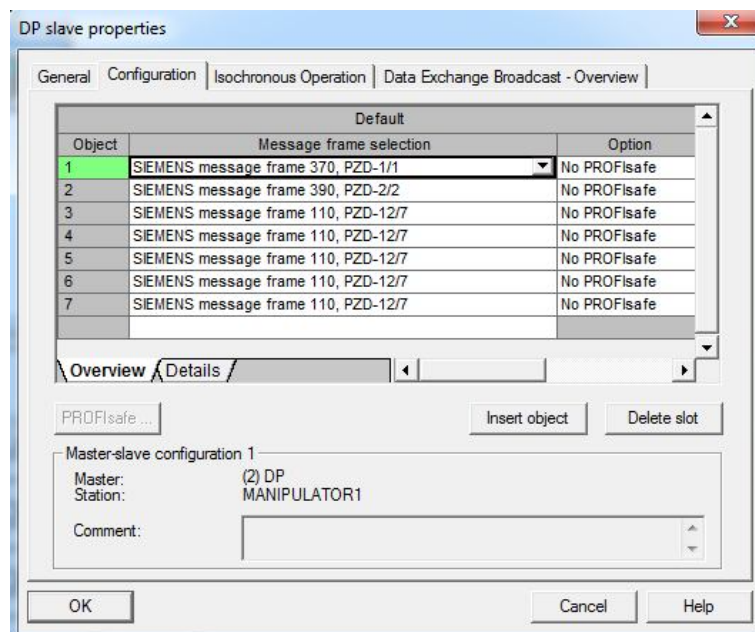
Funkční blok FB31 slouží k parametrizaci pohonů, přepínání základních režimů (jogování, polohování) a v případě os pro zdvihový a svírací motor, také pro kontrolu aktuálního momentu. Vstupní i výstupní parametry každého z pohonů se předávají frekvenčním měničům ve strukturách UDT110 (TELEGRAM_110_CMD) a UDT111 (TELEGRAM_110_STS) pomocí funkčního bloku FB210. Adresy pro jednotlivé pohony jsou určeny podle HW konfigurace frekvenčního měniče a jeho nastavení návaznosti na motory v programu STARTER, viz obr. 31.

Slot	Module	Message frame selection / default	I address	Q address
4	Drive Data	SIEMENS message frame 370, P2D-1/1	256...257	
5	Drive Data	SIEMENS message frame 370, P2D-1/1		256...257
6	Drive Data			
7	Drive Data	SIEMENS message frame 390, P2D-2/2	258...261	
8	Drive Data	SIEMENS message frame 390, P2D-2/2		258...261
9	Drive Data			
10	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7	262...275	
11	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7		262...285
12	Drive Data			
13	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7	286...299	
14	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7		286...309
15	Drive Data			
16	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7	310...323	
17	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7		310...333
18	Drive Data			
19	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7	334...347	
20	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7		334...357
21	Drive Data			
22	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7	358...371	
23	Drive Data	SIEMENS message frame 110, P2D-12/7		358...381

Obr. 31 Konfigurace telegramů v HW konfiguraci frekvenčního měniče

Po provedení parametrizace každého z pohonů je obsah struktur UDT110 a UDT111 přenesen pomocí systémových funkcí SFC14 a SFC15 pro zápis a čtení konzistentních dat přes PROFIBUS DP do frekvenčního měniče.

Součástí FB31 je i signalizace stavu pojistek, jističů, koncových spínačů atd. do vizualizace, kontrola modulu pro ventilátory cizího chlazení, signalizace aktuálního stavu majákem na rozvaděčové skříni atd.



Obr. 32 Konfigurace telegramů

Na obr. 32 výše jsou patrné telegramy, které jsou použity ke komunikaci s měničem. Telegram 370 o velikosti 1/1 (1 byte IN, 1 byte OUT) je používán ke komunikaci s napájecím modulem, telegram 390 ke komunikaci s CPU a 5 telegramů 110 (nebo free BICO telegramů 999 o stejné velikosti), které slouží k ovládání jednotlivých os manipulátoru, tudíž ke komunikaci s motorovými moduly frekvenčního měniče SINAMICS.

Pro manipulátory je použit inteligentní zdroj (SMART INFEED) napájení 6SL3130-6TE23-6Axx s výkonem 36 kW. Řízení je uskutečněno pomocí telegramu 370. Význam jednotlivých bitů vysílání v obou směrech je uveden na obr. 33. Napájecí modul frekvenčního měniče je nutné vypínat se zpožděním z více důvodů

- po vypnutí řídicího signálu OFF1 motorového modulu dojde ke zpomalování osy po rampě, pokud by při tomto zpomalování došlo k odpojení od napájecího zdroje, měnič by zahlásil chybu (poloha pohonu bude mimo očekávané monitorovací okno)
- Zejména pro motory zdvihové je toto velice důležité. Ve fázi, kdy je poloha pohonu držena pouze klidovým proudem, potřebuje frekvenční měnič určitý čas (určený zejména HW koncepcí, rychlostí reakce relátek, ale také parametry měniče, které určují dobu pro reakci brzd) pro uzavření brzd. Po čas potřebný k uzavření brzd by pak mohlo dojít k nekontrolovatelnému propadu osy.

Proto tento blok obsahuje i zpožděné vypínání zdroje napájení.

0	<input type="radio"/> Rdy for switch on (1=Yes / 0=No)	0	<input type="radio"/> Rdy for switch on (1=Yes / 0=No)
1	<input type="radio"/> Ready (1=Yes / 0=No)	1	<input type="radio"/> Ready (1=Yes / 0=No)
2	<input type="radio"/> Operation enabled (1=Yes / 0=No)	2	<input type="radio"/> Operation enabled (1=Yes / 0=No)
3	<input type="radio"/> Fault present (1=Yes / 0=No)	3	<input type="radio"/> Fault present (1=Yes / 0=No)
4	<input checked="" type="radio"/> No OFF2 active (1=OFF2 inactive / 0=OFF2 active)	4	<input checked="" type="radio"/> No OFF2 active (1=OFF2 inactive / 0=OFF2 active)
5	<input type="radio"/> Reserved	5	<input type="radio"/> Reserved
6	<input checked="" type="radio"/> Sw on inhibit (1=Yes / 0=No)	6	<input checked="" type="radio"/> Sw on inhibit (1=Yes / 0=No)
7	<input type="radio"/> Alarm present (1=Yes / 0=No)	7	<input type="radio"/> Alarm present (1=Yes / 0=No)
8	<input type="radio"/> Reserved	8	<input type="radio"/> Reserved
9	<input checked="" type="radio"/> Control request (1=Yes / 0=No)	9	<input checked="" type="radio"/> Control request (1=Yes / 0=No)
10	<input type="radio"/> Reserved	10	<input type="radio"/> Reserved
11	<input type="radio"/> Pre-charging compl (1=Yes / 0=No)	11	<input type="radio"/> Pre-charging compl (1=Yes / 0=No)
12	<input type="radio"/> Line contactor closed (1=Yes / 0=No)	12	<input type="radio"/> Line contactor closed (1=Yes / 0=No)
13	<input type="radio"/> Reserved	13	<input type="radio"/> Reserved
14	<input type="radio"/> Reserved	14	<input type="radio"/> Reserved
15	<input type="radio"/> Reserved	15	<input type="radio"/> Reserved

Obr. 33 Telegram 370 - význam jednotlivých bitů

Další částí tohoto FB je blokování spouštění jednotlivých režimů. Pro manipulátory jsou podmínky následující:

1. Servisní režim – je inicializován při každém spuštění frekvenčního měniče. Z ostatních režimů se do tohoto dá přejít jen v případě, že se žádná z os nepohybuje – to je určeno parametry měniče (axis moves forward – r2683.4 a axis moves backward - r2683.5). Ze servisního režimu je povolen přechod pouze do manuálního režimu
2. Manuální režim – přechod do manuálního režimu je umožněn ze všech režimů, ale pouze za podmínky, že se žádná osa nepohybuje. Z manuálního režimu je umožněn přechod od všech ostatních režimů.
3. Poloautomatický režim – Do poloautomatického režimu je umožněn přechod z manuálního režimu, pokud se žádná osa nepohybuje nebo přechod z automatického režimu, kdy je dokončen poslední volaný cyklus manipulátoru a dále se čeká na zadání od obsluhy.
4. Automatický režim – do automatického režimu je umožněn přechod z manuálního režimu za podmínky, že jsou osy manipulátoru ve výchozích pozicích nebo přechod z poloautomatického režimu.

5.3 Základní cykly manipulátoru

Funkční blok FB35 slouží k vykonávání delších sad pohybů, do kterých se dynamicky doplňují aktuální údaje. Naprogramováno je těchto šest základních smyček:

- Jízda na pozici s natáčením kola na kamery
- Jízda na pozici s vyhýbáním mezi ventilátory
- Odebírání kola z dopravníku manipulátorem bez laserů v kleštinách
- Pokládání kola na dopravník manipulátorem bez laserů v kleštinách
- Odebírání kola ze stroje
- Pokládání kola do stroje

Protože jsou manipulátory využívány na více defektoskopických linkách, je pro některé aplikace nutná modifikace těchto základních funkcí. Taktéž manipulátory pro použití na neobrobená kola hardwarově upravené (přidáním odměřovacích laserů pod

úroveň kleštin, aby bylo možné přesně detekovat okolek-místo pro uchopení). Pro linku se sofistikovanějšími stroji jsou tedy ještě cykly:

- Odeber kolo z tvrdoměru
- Polož kolo do tvrdoměru
- Odebírání kola z dopravníku manipulátorem s lasery v kleštinách
- Pokládání kola na dopravník manipulátorem s lasery v kleštinách

5.3.1 Jízda na pozici s natáčením kola na kamery

Při volání cyklu „jízda“ je v prvních třech krocích provedena kontrola aktuálního režimu a stavu os. Ve stavu 3 je potom smyčka, vyčkávající na zadání cílové polohy a kontrolující, zda je nastaven příznak NATACENI_NA_KAMERY. Pokud tomu tak není, manipulátor po provedení rotace do horizontální polohy jede na cílovou pozici.

Pokud je při volání tohoto cyklu parametr NATACENI_NA_KAMERY nastaven, je potřeba, aby manipulátor při žádosti od operátora nebo nadřazeného řídicího systému (hlavního PLC nebo také koncentrátoru) zajel před pokládáním kola do některého ze strojů nejprve před kamery, které jsou umístěné na dráze, a zde po otočení kola vyčkal zadání ID čísla. ID je pomocí InTouch zpracováno a odesláno dále do podnikové databáze. Po této operaci pak manipulátor pokračuje na cílovou pozici.

5.3.1 Jízda na pozici s vyhýbáním mezi kamerami

Druhou modifikací je vyhýbání se části linky s ventilátory, kde je nutné nést kolo ve svislé poloze. Po obdržení povelu se z aktuální pozice pojezdové osy a pozice cílové vypočte, do jaké polohy je nutné rotovat kolo, aby nedošlo ke kolizi a zda je nutné při jízdě manipulátorem zastavit na *otáčecí* pozici, kde je možné bezpečně měnit polohu drženého kola.

Před každým zahájením pohybu ve vodorovné ose je podle aktuální polohy kontrolován úhel natočení drženého kola a popřípadě provedena rotace. Tím je zajištěno, že při přechodu ze servisního či manuálního režimu nedojde nikde ke kolizi.

5.3.2 Odebírání kola z dopravníku manipulátorem bez laserů v kleštinách

Pokládání se, stejně jako odebírání, liší pro daný typ manipulátoru. Pro manipulátor bez laserového odměřování je ještě před aktivací potřebných os a parametrizací pohonů vyčkávací smyčka, ve které se čeká na aktuální data od koncentrátoru (výška sloupce a průměr kola na vrchu štosu). Po uvedení os rotací a svěru do správné polohy, je zahájena zdvihovým motorem jízda na výšku přijatou od koncentrátoru.

Svírání kola probíhá ve třech fázích. V první se kleštiny sevrou vyšší rychlostí tak, aby se zmenšila mezera mezi kladkami v kleštinách a okolkem kola. V druhé fázi je zahájeno svírání dle momentu motoru. Vzhledem k tvrdosti kol i kladek v kleštinách, je nutné výrazně zmenšit rychlost svírání, aby byl náběh momentu při zapření kladek co nejméně strmý. Při vyšší rychlosti totiž moment vzroste velmi rychle, a i když se poté zpomaluje po velmi krátké rampě, stihne přesáhnout maximální moment motoru a frekvenční měnič to vyhodnotí jako chybu.

Po sevření je motor odpojen od buzení a kolo je drženo za pomoci brzdy. Následně je změněna parametrizace zdvihového motoru pro jízdu s kolem a vyzvednutí kola do výšky.

5.3.3 Pokládání kola na dopravník manipulátorem bez laserů v kleštinách

Pro manipulátory bez laserového odměřování v kleštinách je cyklus zahájen vyčkáváním na aktuální údaje o výšce štosu kol pod sebou. Po jejich obdržení jsou aktivovány (nabuzeny) potřebné pohony a rotuje se s kolem do horizontální polohy. Jízda zdvihovým motorem dolů je pak rozdělena do dvou fází: V první fázi je k výšce štosu, přijaté od koncentrátoru, přičtena konstantní hodnota (20cm), do které zdvihový motor jede rychleji. Po jejím dosažení je spuštěna druhá fáze, ve které je letmo (bez zastavení) parametrizován na jízdu menší rychlostí, při které je kontrolován aktuální moment motoru.

Pokládání dle aktuálního momentu funguje na následujícím principu: Rameno manipulátoru je v podstatě pohonem přibrzdováno (záporný moment) v okamžiku, kdy je tento moment větší než nula o definovanou hodnotu (rameno se začíná zapírat o překážku) je předpokládáno, že kolo je již na vrcholu štosu.

Nyní se můžou rozevřít kleštiny a po rozevření se zdvihová osa vrací do základní výšky pro pojezd manipulátoru (s danými parametrizačními sadami).

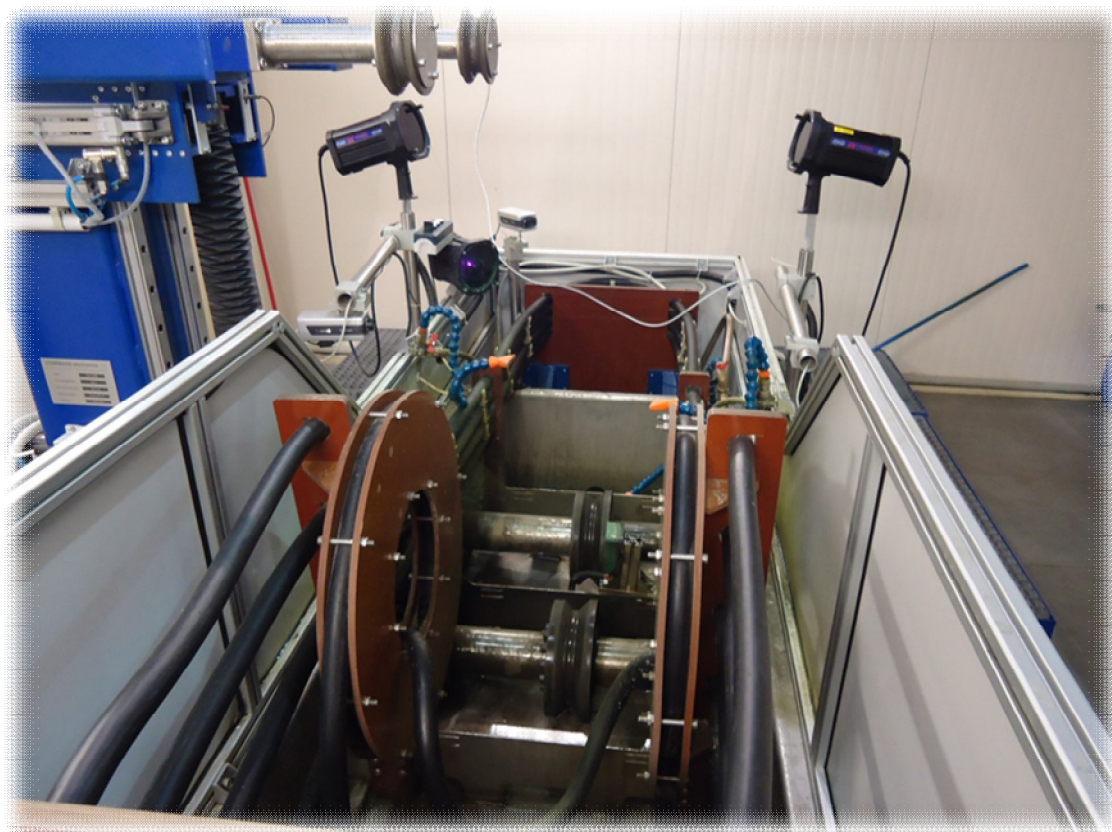
5.3.4 Odebírání kola ze stroje

Odebírání ze stroje je povoleno jen při obdržení příznaku STROJ_ODBER_MOZNY od zařízení, nad kterým se manipulátor aktuálně nachází. Po jeho obdržení se přijmou údaje o výšce, do které je nutné zdvihovým motorem dojet, aby bylo uchopení kola co nejlepší (výpočet výšky je proveden v koncentrátoru). Tímto je zajištěna invariantnost měřicí linie vůči rozměrům kol. Při dosažení správné výšky je kolo ve stroji sevřeno ve třech fázích (viz. Kapitola 5.3.2). Poté je aktuální stroj bitem KOLO_UCHYCENO informován, že může uvolnit sevření, o čemž je manipulátor zpětně informován bitem STROJ_KOLO_UVOLNENO a zdvihová osa se s parametry pro jízdu s kolem navrátí do výchozí pozice.

5.3.5 Pokládání kola do stroje

V prvních stavech probíhá kontrola základních příznaků (drží manipulátor kolo?, je stroj pod manipulátorem volný?). Po této kontrole se nastaví bit v komunikačním bloku COM_NOVE_KOLO, který informuje zařízení pod manipulátorem, aby se připravil na kolo dané velikosti (rozměry kola se získají z koncentrátoru z interně vytvářené databáze kol na lince). Po této akci čeká, dokud nedostane příznak nazpět a bude se moci zahájit vkládání.

Výška pro pokládání je vypočítávána v koncentrátoru a odesílána do manipulátoru v komunikačním bloku. Vzhledem k tomu, že komunikace probíhá pomocí bezdrátového připojení, tak se před načtením zdvihové výšky vyčkává na hranu bitu BIT_OF_LIFE (ten vkládá do komunikačního bloku koncentrátor a mění svojí hodnotu s periodou 1s). Tím je zajištěna aktuálnost této informace. Výška je vypočtena z aktuálního průměru kola, konstantě zadaných průměrů kladek ve stroji a jejich výšce nad zemí podle jednoduchého vztahu.



Obr. 34 Detail testovací linky využívající magnetickou práškovou metodu

5.3.6 Odebírání kola z tvrdoměru

Manipulátor vyčkává nad tvrdoměrem na status KOLO_HOTOVO, který ho informuje, že je kolo vyvezeno na předávací plošinu. Poté aktivuje potřebné osy a dojde zdvihem na zadanou pozici (výška kola i pozice okolku se může měnit, proto je dynamicky vypočítávána z údajů v interní databázi koncentrátoru). Sevření pomocí momentu je stejné jako v kapitole 5.3.2. Při sevření kola se stáhnou výsledky měření a poté se zdvihová osa vrátí do výchozí pozice.

5.3.7 Pokládání kola do tvrdoměru

Pro sofistikovanější stroje jako je tvrdoměr, je pokládání pozastaveno při neplatném zadání vstupních dat nebo parametrů pro provedení měření. Tyto údaje zadává obsluha.

Po aktivaci potřebných os je tvrdoměr informován bitem v komunikačním DB NOVE_KOLO a odešlou se mu parametry zkoušky a rozměry vkládaného kola. Jakmile je tvrdoměr připraven na příjem, informuje o tom manipulátor, který odloží kolo na předávací plošinu. Při jízdě zdvihem zpět do výchozí pozice je tvrdoměr informován, že má volno a může bezpečně zahájit svojí činnost.

5.3.8 Odebírání kola z dopravníku manipulátorem s lasery v kleštinách

Kleštiny manipulátoru jsou vybaveny odměřovacími lasery, které jsou využívány při odebírání neopracovaných kol z dopravníků (jejich rozměry mají velké chyby a výpočet výšky stejně jako v předchozích odstavcích je velice nepřesný). Navíc

je při tomto režimu možné vkládat pod manipulátor libovolně vysoký štos kol bez nutnosti zadávání počtu kol. Dalším důvodem pro integraci laserů do kleštin bylo zadání od zákazníka, který požadoval, aby byl manipulátor schopný odebírat kola položená v libovolné poloze (okolkem nahoru nebo dolů).

Při odebírání kola z dopravníku manipulátor převezme obsluhou zadaný průměr kol a rozevře kleštiny o 10cm více. Poté převezme nastavení z parametrické sady 1 a jede zdvihovým motorem dolů do té doby, než lasery zaregistrují překážku. V tom okamžiku se přeparametruje pohon (parametrická sada 2) a pokračuje dále dolů, přičemž lasery skenují povrch kola. Manipulátor svírá kola přes okolek, což je nejvíce vystouplá část a proto se při skenování porovnávají aktuální hodnoty z laseru a cyklicky se ukládá aktuálně nejmenší a největší naměřená vzdálenost a pozice zdvihového enkodéru, ve kterém byla tato vzdálenost naměřena. Pro urychlení cyklu odebírání dojde manipulátor pouze do poloviny výšky kola a z naměřených dat určí, zda byl okolek nalezen. Pokud je tomu tak, vrátí se na tuto pozici a sevře ho. Pokud ne, pokračuje až po spodní okraj, kde se opět provede vyhodnocení.

Vyhodnocení je na základě difference mezi naměřenými vzdálenostmi. Pokud byla tato difference na měřeném úseku větší než 70% zadané výšky okolku, pak je určeno, že se zde nachází okolek a přesná pozice je potom určena pozicí nejmenší naměřené vzdálenosti.

Svíráni potom probíhá ve stejných třech fázích, jak je uvedeno v kapitole 5.3.2 a po nastavení příznaku SEVRENO je proveden návrat zdvihové osy do optimální výšky pro možnost přepravy kola dále po lince.

Z nutnosti přibrzdit a poté se vracet se zdvihovou osou je tento cyklus o poznání pomalejší než při odebírání opracovaných kol.

5.3.9 Pokládání kola na dopravník manipulátorem s lasery v kleštinách

Pro manipulátor s laserovým odměřováním je do komunikačního bloku přidán údaj od optických závor na dopravnících pod manipulátorovou drahou. V případě, že tato závora není přerušena (předpokládá se, že pod drahou ještě není žádné kolo) jede se se zdvihovým motorem do polohy těsně nad dopravníkem, kde je spuštěna fáze odložení dle aktuálního momentu pohonu. Pokud je závora přerušena, jede se s danou osou do té doby, než je laserovým odměřováním v kleštinách manipulátoru zaznamenána překážka.

5.4 Popis programu koncentrátoru

PLC SIMATIC S7-300, které je v tomto projektu použito ke koncentraci dat o provedeném měření, je taktéž použito k ovládání vstupních a výstupních dopravníků a komunikaci i řízení s decentralizovanými jednotkami SIMATIC umístěných v manipulátorech a strojích pro defektoskopická měření. Komunikace s manipulátorovými jednotkami IM150-7F je realizována po síti ProfiNET.

Vzhledem k časové tísni při dokončování projektu nebyl automatický režim pro linku v Kazachstánu dosud implementován. Proto zde bude v následujících odstavcích řeč o lince v Bonatransu. Manipulátory této linie jsou upraveny pro odebírání a poklad kol lasery v kleštinách a pro měření jsou zde dva tvrdoměry, které při přebírání dat vyžadují trochu sofistikovanější způsob předávání dat (viz kapitola 5.3).

5.4.1 Ovládání manipulátorů v automatickém režimu

Linka je navržena tak, aby mohli manipulátory v automatickém režimu pracovat samostatně i všechny zároveň. Automatický režim každého z manipulátorů je řízen samostatným stavovým automatem. Jejich grafické znázornění je na obrázcích níže. „Chování“ manipulátoru v automatickém režimu se liší pro následující události:

1. V automatickém režimu je přepnut pouze jeden z manipulátorů a:
 - a. Druhý z nich je bezpečně zaparkován
 - b. Druhý je zapnut a přepnut v servisním nebo manuálním nebo poloautomatickém režimu
 - c. Druhý manipulátor má poškozené odměřování, není zaparkován, a tudíž je jeho pozice na dráze neznámá.
2. V automatickém režimu jsou oba manipulátory.

Způsob rozhodování se pro různé manipulátory liší jen v několika bodech, jak je uvedeno níže v popisu stavů.

- Stav 0 – Slouží ke kontrole startovacích podmínek, které musí být pro přechod do automatického režimu splněny.
- Stav 1 – Je výchozím cyklem automatu. Pokud je možné vkládat kola do některého ze strojů, zkontroluje se, zda již nějaké kolo drží či ne, a podle toho se přechází do stavu 2 nebo 3.
- Stav 2 – Manipulátor nedrží kolo, proto se podle nastavených priorit rozhodne, kam pro něj pojede. Nalezení nejvhodnější pozice se liší zejména podle počtu spuštěných manipulátorů a pozice, ze které je možné směřovat kolo na výstup linky nejrychleji. Rozhodnutí se provádí podle následující logiky:
 - Pokud je spuštěn pouze jediný manipulátor a některý ze spuštěných strojů nezpracovává kolo - jede pro kolo na některý z vstupních vozíků.
 - Pokud je spuštěn pouze jeden manipulátor a všechny spuštěné stroje jsou plné – vyčkává nad strojem a čeká na výdej kola
 - Pokud jsou spuštěny oba manipulátory záleží na tom, k čemu má daný manipulátor prioritně sloužit. Pokud je zvolen pro zavážení kol a některý ze zašlých strojů je zapnutý, jede manipulátor vyzvednout kolo na vstupní dopravník, nad kterým potom čeká, než se některý z měřících strojů uvolní. V případě, že je manipulátor zvolen pro odvážení kol a v žádném stroji není, tak odjíždí nad výstupní dopravník s nastaveným bitem UHYBANI, kde čeká na výdej kola (uvolňuje cestu manipulátoru pro zavážení)
- Stav 3 – Podobné stavu 2, ale manipulátor již drží kolo, proto se rozhoduje, kam jej zaveze:
 - Pokud je spuštěn pouze jediný manipulátor a některý ze spuštěných strojů nezpracovává kolo – zaveze do něj držené kolo.

- Pokud jsou spuštěny oba manipulátory záleží na tom, k čemu má daný manipulátor prioritně sloužit. Pokud je zvolen pro zavážení kol a některý ze zašlých strojů je připraven na příjem, jede do něj manipulátor vložit kolo. V případě, že je manipulátor zvolen pro odvážení kol, tak kolo které drží již bylo změřeno a proto ho odváží na výstupní vozík.
-
- Stav 4 – Provedení jízdy na zadanou pozici a kontrola, zda-li jí bylo opravdu dosaženo.
- Stav 5 – Provedení cyklu pro odebrání kola z dopravníku s kontrolou úspěšného dokončení celé operace.
- Stav 6 - Provedení cyklu pro pokládání kola na dopravníku s kontrolou úspěšného dokončení celé operace.
- Stav 7 - Provedení cyklu pro pokládání kola do stroje, nad kterým se nachází, s kontrolou úspěšného dokončení celé operace.
- Stav 8 - Provedení cyklu pro odebrání kola ze stroje, nad kterým se nachází, s kontrolou úspěšného dokončení celé operace.
- Stav 9 až stav 19 – rezerva.
- Stav 20 – V tomto stavu se ověřuje, jestli je cesta na požadovanou pozici volná (jestli v cestě nestojí nebo jestli nejede na kolizní pozici jiný manipulátor). Způsob vyhodnocení se liší podle následujících situací:
 - Jezdí jen jeden manipulátor a druhý je bezpečně zaparkovaný
 - Jezdí oba manipulátory
 - Od jednoho z manipulátorů nepřichází údaj o jeho poloze
- Stav 21 – Vyhodnocení další akce po dosažení žádané pozice. Podle aktuální pozice se provede odebrání/pokládání na dopravník či pokládání/odebrání z tvrdoměru (podle toho, jestli manipulátor nese nebo nenese kolo). V případě, že má manipulátor nastavený bit CEKEJ, neprovede se žádná operace (manipulátor zřejmě nemohl dojet na cílovou pozici, proto si popojede na pozici nejbližší k cíli a čeká, dokud se cesta neuvolní).
- Stav 22 až stav 40 – rezerva

Automaty pro automatické režimy jsou volány ve funkčním bloku FB35 a průběžný stav je uchováván v DB185 nebo DB180 a DB181 pro manipulátor 1 a DB182 a DB183 pro manipulátor 2.

Funkce jednoho manipulátoru v automatu je následující: Po spuštění automatického režimu manipulátor neprovádí žádnou činnost, dokud nedostane informace o tom, že má na vstupním dopravníku kola, existuje tvrdoměr, do kterého je kolo možné položit a je zvolen výstupní dopravník. Pokud je vše splněno, dojde nad vstupní dopravník a odebere kolo. Když jsou kola na žádost operátora opatřena indexem OTACET_NA_KAMERY, tak se manipulátor rozjede na pozici mezi kamerami, kde čeká, než obsluha opíše a potvrdí ID kols. Poté se vyhodnotí, do kterého z tvrdoměrů bude kolo zavezeno, dojde nad něj a provede pokládání do tvrdoměru s předáním všech potřebných dat. Pokud je další tvrdoměr volný a zapnutý, doveze se do něj taktéž

kolo. Při zaplnění všech tvrdoměrů manipulátor čeká na výdej kola nad tím, do kterého naposledy vloženo. Jakmile nastaví jeden z tvrdoměrů status KOLO_HOTOVO, tak se pro něj dojede, odebere a podle výsledku měření ho odloží na zvolený výstupní dopravník. Cyklus se neustále opakuje a dovážení kol má větší prioritu než odvážení. Tento cyklus může provádět jakýkoliv z manipulátorů (pokud má informaci, že ostatní jsou zaparkovány na parkovacích pozicích).

Při automatickém režimu obou manipulátorů je funkce linky následující: Manipulátor nad vstupními dopravníky (dále manipulátor1) je určen na zavážení kol a manipulátor nad výstupními vozíky dále manipulátor2) je určen na odvážení kol z tvrdoměrů. Pokud není co odvážet ani dovážet, tak manipulátory zajedou nad své výchozí pozice a čekají na impuls k zahájení funkce. Jakmile jsou kola pod manipulátorovou drahou, manipulátor1 kolo vyzvedne a zaváže do tvrdoměrů podle stejné logiky jako je uvedena v odstavci výše. Po zavezení kola se vrací nad vstupní dopravník (čímž uvolní cestu manipulátoru2), vyzvedne další kolo a čeká na uvolnění některého z tvrdoměrů

Manipulátor2 je určen k odvážení kol. Jakmile některý tvrdoměr dokončí měření, tak dojde vyzvednout kolo a položí ho na výstupní dopravník.

Kolize byly v okamžik dokončování této práce řešeny následovně: Pokud má manipulátor v cestě druhý, dojde jen na nejbližší pozici, ve které nedojde ke srážce a vyčkává, než mu druhý manipulátor uvolní cestu. Toto uvolnění cesty je zaručeno zajížděním manipulátorů do svých výchozích pozic po dokončení zavážení/odvážení kola do tvrdoměrů. V okamžik, kdy se manipulátor rozjede, obdrží druhý (čekající) manipulátor informaci o tom, že má cílovou pozici volnou a dojde na ní.

5.4.2 Tvorba interní databáze

Interní databáze je tvořena pomocí funkčního bloku FB100 a uchovává se v datovém bloku DB101. Každá pozice na lince, je zde popsána pomocí datové struktury UDT33. Ta se dále skládá ze dvou dalších datových struktur UDT30, UDT31 a UDT32, které využity při předávání dat do tvrdoměrů, a bitů MERENI_PROVEDENO, OTACET_NA_KAMERU a ID_ZADANO, které slouží jako identifikátory pro automatický režim.

Informace o rozložení kol na lince je důležité především pro automatický režim. Díky údajům, které je možné z této databáze vydedukovat, jsou ovládány jak manipulátory, tak i výstupní vozíky (podle počtu kol položených ve sloupci na dopravníku je určeno, kdy budou vyvezena na výstup z linky – obraceče).

Identifikátor MERENI_PROVEDENO informuje manipulátor, že kolo, které aktuálně drží v kleštinách, již bylo proměřeno a je ho možné směřovat na výstup z linky (popřípadě do dalšího měřicího zařízení).

OTACET_NA_KAMERU je identifikátor, který při manipulaci s kolem zajistí, že je nejprve dovezeno mezi kamery, kde obsluha odečte identifikační číslo a popíše jím právě držené kolo. Tento identifikátor je nutný, jelikož linka umožňuje tři druhy zadávání ID:

1. Vizualním odečtením obsluhou a zadáním ID do vizualizace
2. Pomocí čtečky čárových kódů
3. Po síti PROFIBUS od linky, která kolo zpracovávala před vstupem do této.

Poslední identifikátor ID_ZADANO slouží jako informace, že kolo je již opatřeno ID číslem.

Samotná databáze má následující strukturu (obr. 35)

Address	Name	Type
0.0		STRUCT
+0.0	manipulatory	STRUCT
+0.0	manip_1	"KOLO_INFO"
+288.0	manip_2	"KOLO_INFO"
+576.0		END_STRUCT
+576.0	tvrdomery	STRUCT
+0.0	tvrdomer_1	"KOLO_INFO"
+288.0	tvrdomer_2	"KOLO_INFO"
+576.0	r	"KOLO_INFO"
+864.0	r1	"KOLO_INFO"
+1152.0		END_STRUCT
+1728.0	DOPR4	STRUCT
+0.0	poz_0	"KOLO_INFO"
+288.0	poz_1	"KOLO_INFO"
+576.0	poz_2	"KOLO_INFO"
+864.0	poz_3	"KOLO_INFO"
+1152.0	poz_10	"KOLO_INFO"
+1440.0	poz_11	"KOLO_INFO"
+1728.0	poz_12	"KOLO_INFO"
+2016.0	poz_13	"KOLO_INFO"
+2304.0	poz_20	"KOLO_INFO"
+2592.0	poz_21	"KOLO_INFO"
+2880.0	poz_22	"KOLO_INFO"
+3168.0	poz_23	"KOLO_INFO"
+3456.0	vstup	"KOLO_INFO"
+3744.0	pocet_kol	INT
+3746.0		END_STRUCT
+5474.0	DOPR3	STRUCT
+0.0	poz_0	"KOLO_INFO"
+288.0	poz_1	"KOLO_INFO"
+576.0	poz_2	"KOLO_INFO"
+864.0	poz_3	"KOLO_INFO"
+1152.0	poz_10	"KOLO_INFO"
+1440.0	poz_11	"KOLO_INFO"
+1728.0	poz_12	"KOLO_INFO"
+2016.0	poz_13	"KOLO_INFO"
+2304.0	poz_20	"KOLO_INFO"
+2592.0	poz_21	"KOLO_INFO"
+2880.0	poz_22	"KOLO_INFO"
+3168.0	poz_23	"KOLO_INFO"
+3456.0	vstup	"KOLO_INFO"
+3744.0	pocet_kol	INT
+3746.0		END_STRUCT
+9220.0	DOPR2	STRUCT
+0.0	poz_0	"KOLO_INFO"
+288.0	poz_1	"KOLO_INFO"
+576.0	poz_2	"KOLO_INFO"
+864.0	poz_3	"KOLO_INFO"
+1152.0	poz_10	"KOLO_INFO"
+1440.0	poz_11	"KOLO_INFO"
+1728.0	poz_12	"KOLO_INFO"
+2016.0	poz_13	"KOLO_INFO"
+2304.0	poz_20	"KOLO_INFO"
+2592.0	poz_21	"KOLO_INFO"
+2880.0	poz_22	"KOLO_INFO"
+3168.0	poz_23	"KOLO_INFO"
+3456.0	vstup	"KOLO_INFO"
+3744.0	pocet_kol	INT
+3746.0		END_STRUCT
+12966.0	DOPR1	STRUCT
+0.0	poz_0	"KOLO_INFO"
+288.0	poz_1	"KOLO_INFO"
+576.0	poz_2	"KOLO_INFO"
+864.0	poz_3	"KOLO_INFO"
+1152.0	poz_10	"KOLO_INFO"
+1440.0	poz_11	"KOLO_INFO"
+1728.0	poz_12	"KOLO_INFO"
+2016.0	poz_13	"KOLO_INFO"
+2304.0	poz_20	"KOLO_INFO"
+2592.0	poz_21	"KOLO_INFO"
+2880.0	poz_22	"KOLO_INFO"
+3168.0	poz_23	"KOLO_INFO"
+3456.0	vstup	"KOLO_INFO"
+3744.0	pocet_kol	INT
+3746.0		END_STRUCT
+16712.0	nulovy_blok	"KOLO_INFO"
+17000.0	pomocny_blok	"KOLO_INFO"
+17288.0		END_STRUCT

Obr. 35 Struktura databáze

O významu jednotlivých pozic je v následujícím textu uvedeno více detailních informací. Slovo „počet_kol“ je cyklicky aktualizováno funkcí FC100, a dává systému informaci o aktuálním počtu odložených kol ve štosu pod manipulatorovou dráhou. Tam se mohou v jednom okamžiku nacházet maximálně 4 kola, jinak by docházelo ke kolizi. Struktura bloku UDT33 (KOLO_INFO) je na obr. 36.

Address	Name	Type
0.0		STRUCT
+0.0	kolo_rozmary	"KOLO_DATA"
+50.0	parametry_zkousky	"CTRL_DATA"
+150.0	vysledky_zkousky	"VYSLEDKY"
+188.0	MERENI_PROVEDENO	BOOL
+188.1	OTACET_NA_KAMERU	BOOL
+188.2	ID_ZADANO	BOOL
+190.0	rezerva	ARRAY[1..98]
*1.0		BYTE
=288.0		END_STRUCT

Obr. 36 Struktura bloku UDT33

Struktura UDT30 (KOLO_DATA) obsahuje informace a fyzických rozměrech kola v procesu. Data jsou zadávána obsluhou a jsou zatížena poměrně velkou chybou. Pro manipulaci je tedy použit pouze rozměr D (průměr), pro rozevření svěru při odebírání kola. Tuto hodnotu je možné taktéž porovnávat s hodnotou od vstupního dopravníku, kde se při výpočtu přesné pozice pod manipulátorovou drahou měří průměr kol pomocí enkodéru na pohonu a optické závory. Informace v této struktuře jsou důležité zejména pro nastavení os tvrdoměrů při měření či přijímáním kola.

Address	Name	Type
0.0		STRUCT
+0.0	d1	REAL
+4.0	L	REAL
+8.0	D	REAL
+12.0	h1	REAL
+16.0	x	REAL
+20.0	Y	REAL
+24.0	H	REAL
+28.0	res1	REAL
+32.0	res2	REAL
+36.0	res3	REAL
+40.0	res4	REAL
+44.0	res5	REAL
+48.0	res6	WORD
=50.0		END_STRUCT

Obr. 37 Struktura bloku UDT30

Struktura UDT31 (CTRL_DATA) (obrázek) slouží k nastavení parametrů měření a je taktéž uchovávána pro každé kolo v databázi. Bity mají vliv například na: typ zkoušky (jedno měření, vícenásobné měření,...), hloubku frézované drážky, otáčkách frézovací hlavy, počtu vtisků při vícenásobném měření atd. Struktura bloku UDT31 je uvedena na obr. 38.

Address	Name	Type
0.0		STRUCT
+0.0	ZKOUSKA_TYP	INT
+2.0	KOLO_POSUV	REAL
+6.0	POCET_VTISKU	INT
+8.0	ROZESTUP_VTISKU	REAL
+12.0	VTISK_POLOHA	REAL
+16.0	VTISK_HLOUBKA	REAL
+20.0	N_FREZOVACI	REAL
+24.0	V_FREZOVACI	REAL
+28.0	ORIENTACE_KOLA	INT
+30.0	ROZTECNA_KRUZNICE_D	REAL
+34.0	RES	ARRAY[1..66]
+1.0		BYTE
=100.0		END_STRUCT

Obr. 38 Struktura bloku UDT30

Výsledky měření z jednotlivých tvrdoměrů jsou předávány a uchovávány v následující struktuře UDT32 (VYSLEDKY):

Address	Name	Type	Initial value
0.0		STRUCT	
+0.0	JEDNOTLIVE	STRUCT	
+0.0	VTISK_1	INT	0
+2.0	VTISK_2	INT	0
+4.0	VTISK_3	INT	0
=6.0		END_STRUCT	
+6.0	NASOBNE	STRUCT	
+0.0	VTISK_1	INT	0
+2.0	VTISK_2	INT	0
+4.0	VTISK_3	INT	0
+6.0	VTISK_4	INT	0
+8.0	VTISK_5	INT	0
+10.0	VTISK_6	INT	0
+12.0	VTISK_7	INT	0
+14.0	VTISK_8	INT	0
+16.0	VTISK_9	INT	0
+18.0	VTISK_10	INT	0
+20.0	VTISK_11	INT	0
+22.0	VTISK_12	INT	0
+24.0	VTISK_13	INT	0
+26.0	VTISK_14	INT	0
+28.0	VTISK_15	INT	0
+30.0	VTISK_16	INT	0
=32.0		END_STRUCT	
=38.0		END_STRUCT	

Obr. 39 Struktura bloku UDT32

Podle této výsledkové tabulky (viz obr. 39) následně manipulátor v automatickém režimu třídí kola na výstupní dopravníky (pokud je to obsluhou požadováno).

Databáze je aktualizována přesunem celých struktur UDT33 pomocí systémový funkce BLKMOV po pozicích v DB101 následujícím způsobem:

- Při sevření kola manipulátorem - Podle údaje o pozici a náběžné hraně signálu „Drzim_kolo“, dojde k přesunutí struktury UDT33 do pozice manipulátor (kde X je číslo manipulátoru) z pozice, nad kterou se právě nachází. Přesun probíhá pomocí systémové funkce SFC20(BLKMOV). Pozice, odkud a kam se struktury na pozicích v databázi přesouvají, je možné rozdělit do tří skupin:
 - Tvrdoměr 1 a 2 – Na těchto pozicích je cyklicky nastavován bit MERENI_PROVEDENO. Při odvážení kola z této pozice je kolo již opatřeno výsledkovou tabulkou a díky tomuto bitu je v automatickém režimu definován odvoz kola na výstup.
 - Dopravník definovaný jako vstupní
 - Dopravník definovaný jako výstupní
- Při pohybu dopravníku – V závislosti na obsazení dopravníku je při přerušení optických závor přesunut celý štos kol na pozici: a) pod manipulátorovou dráhou, b) uprostřed dopravníku, c) u nebo v překlápěči.

Jelikož systémová funkce SFC20 slouží pouze ke kopírování, je databáze opatřena ještě prázdným (nulovým) blokem, který se při přesouvání kopíruje na pozici, odkud k přesunu došlo.

5.4.5 Řízení datových přenosů a komunikace s periferními jednotkami

Funkční blok FB99 s instančním datovým blokem DB99 jsou vyhrazeny pro přenos datových struktur při obsluhování žádostí pro manipulátor či některý ze strojů pro defektoskopické zařízení.

U přenosů, pro které je žádoucí mít příznak pro dokončení, je kvůli menším časovým prodlevám a většího zabezpečení celistvosti odesílaných dat, použito statických proměnných pro indikaci bezpečně dokončeného kopírování, například:

```
// ===== manipulator 2 =====
A  "MANIP2_COM_SEND".STS2.cekani_na_data_do_HM1
JNB HM1c

CALL "BLKMOV"
SRCBLK := "database kol na lince".manipulatory.manip_2.kolo_rozmary
RET_VAL := #ret_val_sfc20
DSTBLK := "HM1_COM_REC".DATA_1

HM1c: A  BR
NOT
=  #mov_hm2_kolo_sts_m2
```

Příznak #mov_hm2_kolo_sts_m2 pak dále slouží ke spuštění jednorázového přenosu dat do periférie a po jeho dokončení je manipulátor informován, že jeho spuštěná sekvence může dále pokračovat s novými daty pro určený defektoskopický stroj. Pro tento případ např.:

```
S  "MANIP1_COM_REC".CMD1.COM.data_kola_odeslana_HM2
```

Dále jsou ve FB99 permanentně nastavovány některé konstantní proměnné, které jsou specifické např. pro doplňování vstupních dat do komunikačních bloků, zápis vybraných dat do databázových bloků, atd. Podle aktuální pozice manipulátoru také přesměrovává komunikaci při předávání kola do prvního nebo druhého manipulátoru.

Funkční blok FB20 slouží k samotnému přenosu dat do periférií. K této komunikaci je použito systémových funkcí FB14 (GET) a FB15(PUT). Komunikaci je možné rozdělit na:

- Cyklickou – po každém úspěšném odeslání bloku dat je okamžitě přenášén aktualizovaný.
- Podmíněnou – bloky jsou kopírovány jen za podmínek, že je nastaven daný příznak pro přenos dat o aktuálním vkládaném kole (např. `#mov_hm2_kolo_sts_m2`)

5.5 Konfigurace frekvenčních měničů

5.5.1 CPU

Pro řízení pohonů manipulátorů je použit frekvenční měnič (obr. 40) s procesorovou jednotkou SINAMICS S120 verze 4.5. Verze firmware je určena dokoupenou procesorovou paměťovou kartou, bez které je jednotka nefunkční. IP adresu CPU není nutné mít ve stejné síti, jelikož pro komunikaci je použit protokol PROFIBUS, po kterém frekvenční měnič komunikuje s ostatními perifériemi.



Obr. 40 Frekvenční měnič SIMANICS S120

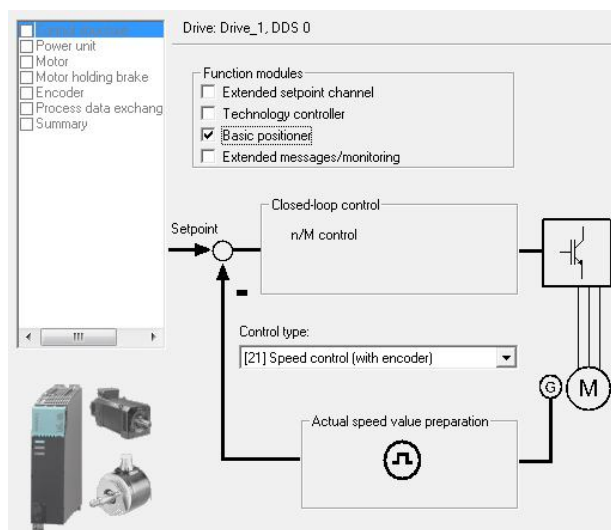
5.5.2 Zdroj napájení

Po vložení procesoru do projektu následuje parametrizace zdroje napětí (Infeed). Pro všechny manipulátory je použit inteligentní třífázový zdroj (smart infeed) řady 6SL3130-6TE23 a pro komunikaci s ním je použit standartní telegram 370, který je pro účely toho projektu dostačující.

5.5.3 Pohony

Dalším krokem je parametrizace pohonů (viz obr. 41) použitých pro jednotlivé osy, kde každý z nich je typu „Servo“. Pohony se do projektu nekládají náhodně, ale podle jejich přesného připojení do měniče (při jejich přidávání do projektu je zároveň automaticky generována topologie celého měniče).

Prvním krokem je určení způsobu řízení pohonu. Pro tento projekt je použito řízení pomocí otáček motoru s funkcí základního polohování. Pro každou osu jsou pak použity dva enkodéry. Jeden pro řízení otáček pohonu – IRC enkodér A/B R a jeden absolutní enkodér SSI pro řízení polohy.



Obr. 41 Parametrizace pohonů

Nastavení pokračuje určením motorového modulu frekvenčního měniče a výběrem a pojmenováním typu motoru, který bude k řízení použit. V tomto projektu jsou použity výhradně indukční motory. Jejich parametry udává výrobce na štítku motoru a jejich přesné hodnoty jsou součástí konfiguračního souboru pro program STARTER, který je součástí projektu na přiloženém CD.

Po výběru a pojmenování typu motoru následuje charakterizování jeho vlastností (viz obr. 42). Je důležité tyto parametry zadat podle manuálu výrobce, jelikož je těchto motorů využito při řízení k omezování proudu a frekvence a tím i k ochraně samotného motoru.

aramete	Parameter text	Value	Unit
p304[0]	Rated motor voltage	400	Vrms
p305[0]	Rated motor current	42.60	Arms
p307[0]	Rated motor power	22.00	kW
p308[0]	Rated motor power factor	0.820	
p310[0]	Rated motor frequency	50.00	Hz
p311[0]	Rated motor speed	1460.0	rpm
p322[0]	Maximum motor speed	3000.0	rpm
p335[0]	Motor cooling type	[1] Force	
p604[0]	Mot_temp_mod 1/KTY alarm threshold	120.0	°C
p605[0]	Mot_temp_mod 1/2 threshold	145.0	°C

The motor data must be entered completely!

☒ Enter optional motor data

☒ Enter optional equivalent circuit diagram data

Note:
Deselection of the optional or equivalent circuit diagram data resets these irrevocably.

Motor identification is required when the equivalent circuit diagram data is deselected. Motor identification is optional when the equivalent circuit diagram data is entered.

aramete	Parameter text	Value	Unit
p320[0]	Motor rated magnetizing current/short-cir.	17.978	Arms
p326[0]	Motor stall torque correction factor	58	%
p338[0]	Motor limit current	0.00	Arms
p341[0]	Motor moment of inertia	0.100582	kgm2
p342[0]	Ratio between the total and motor momen.	1.000	
p344[0]	Motor weight (for the thermal motor mode)	139.4	kg
p348[0]	Speed at the start of field weakening Vdc	1460.0	rpm
p352[0]	Cable resistance	0.00000	ohm
p353[0]	Motor series inductance	0.000	mH

The optional motor data do not have to be entered completely!

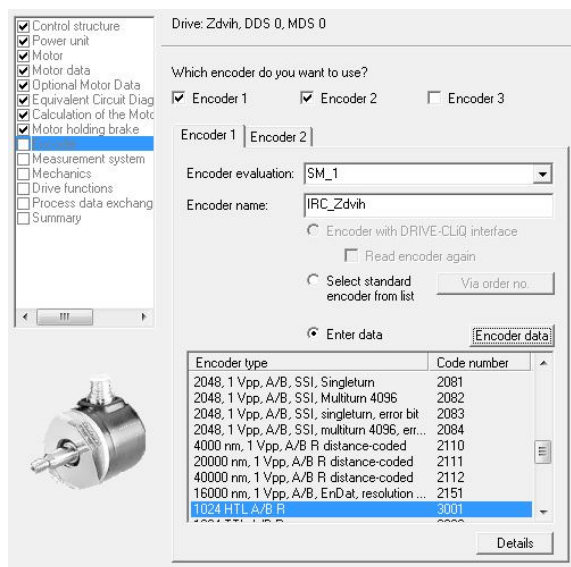
Note: Unknown data must be set to its default value!

If you want to reset all optional data, you must deselect their input on the Motor Data page.

Obr. 42 Charakterizace motoru

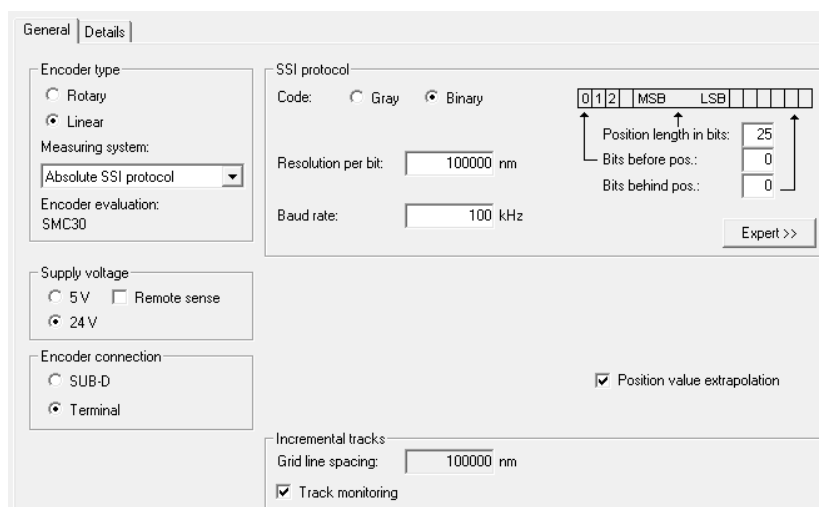
Některé parametry, které jsou při popisu pohonu potřebné, je možné nechat pomocí frekvenčního měniče automaticky dopočítat (volba Complete calculation with equiv. circuit diagram data). Jedná se hlavně o impedance přívodních kabelů, magnetizační proud, apod. Po těchto krocích následuje konfigurace použitého typu brzd motorů. Pro účely tohoto projektu jsou všechny brzdy ovládány frekvenčním měničem vzhledem k aktuálním požadavkům řízení.

Následuje určení parametrů enkodérů (viz obr. 43). Jelikož jsou pohony v tomto projektu řízeny polohově i otáčkově, jsou pro každou osu použity dva enkodéry (s výjimkou rotací, kde je pouze absolutní enkodér).



Obr. 43 Nastavení parametrů enkodéru

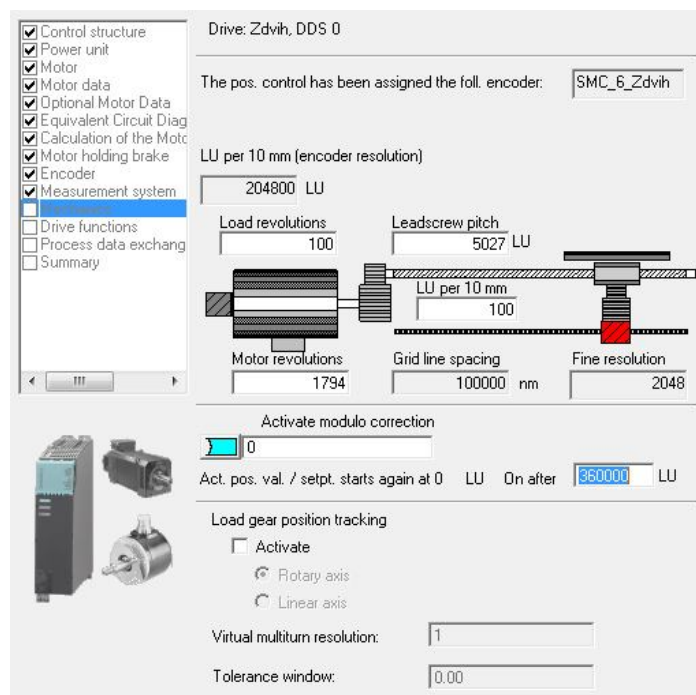
Příklad parametrizace SSI enkodéru je znázorněno na obr. 44. Jedná se o lineární odměřování využívající SSI protokol. Připojení enkodéru je pomocí terminálu (svorkovnice) na některou z enkodérových jednotek SMC30.



Obr. 44 Parametrizace SSI enkodéru

Pokud si nejsme jisti zapojením enkodéru (vzhledem k možnosti inverzí aktuálních hodnot), je možné je nastavit až později při ladění regulátorů a monitorování jednotlivých veličin - špatně určená inverze nebo nepřesné zadání některého z parametrů enkodéru je při monitorování dobře patrná.

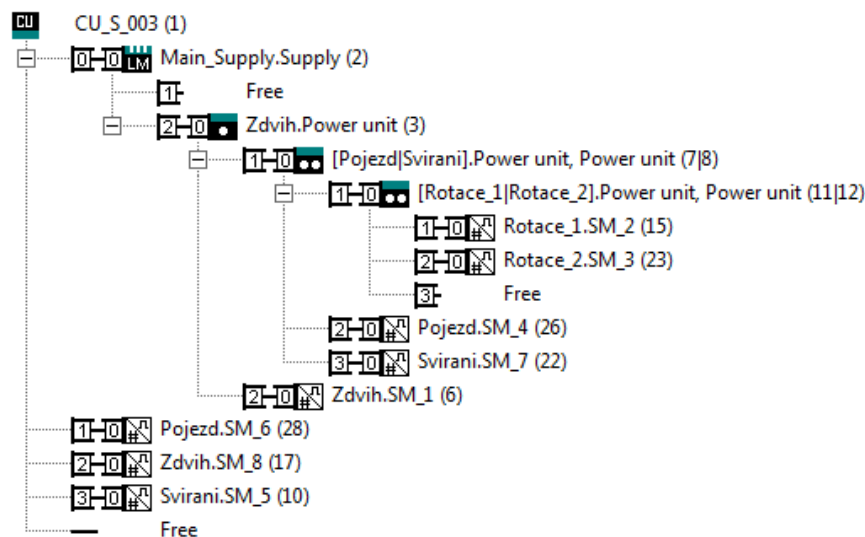
Po zadání všech údajů o použitých enkodérech (viz obr. 45) dané osy se zvolí, který bude použit k polohování. Následně se pokračuje zadáváním mechanických převodů.



Obr. 45 Zadání mechanických převodů

Po zadání vazeb mezi pohonem, převodovou skříní a enkodérem pro odměřování polohy, následuje volba způsobu řízení (SERVO) a určení komunikačního telegramu. V projektu jsou všechny osy řízeny pomocí telegramu 110 s výjimkou zdvihové a svěrové osy, u kterých je telegram 110 rozšířen na BICO telegram 999, jelikož do nich bylo nutné přidat informaci o aktuálním momentu.

Po parametrizaci všech pohonů je topologie měniče uvedena na obr. 46.

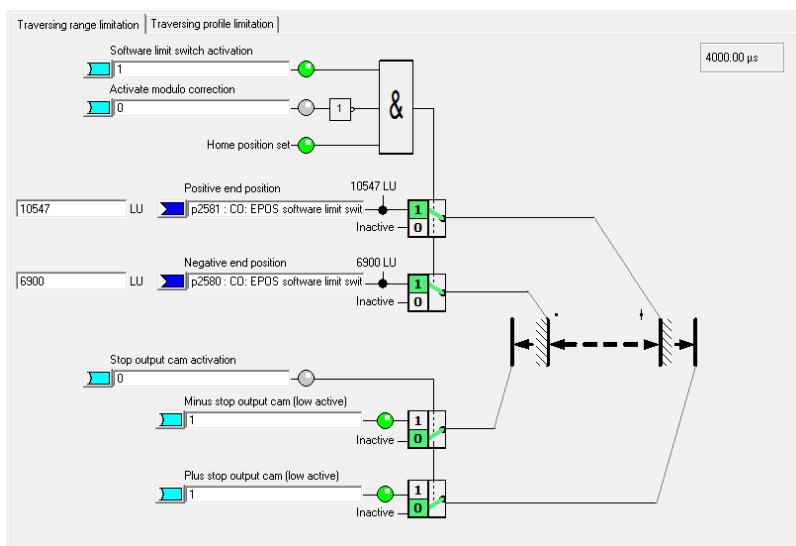


Obr. 46 Topologie konfigurace frekvenčního měniče

Motorové moduly frekvenčního měniče jsou propojeny s jednotlivými enkodéry pomocí tzv. drive CliQ propojení. Signál přicházející od jednotlivých encodérů (A-B, A-B/R, SSI, atd.) je přiváděn do encodérových jednotek SMC30, které jsou pomocí Drive CliQ kabelů propojeny s motorovými moduly měniče. Topologie je tedy generována na základě těchto propojení.

5.5.5 Nastavení omezení, ramp a nulové značky

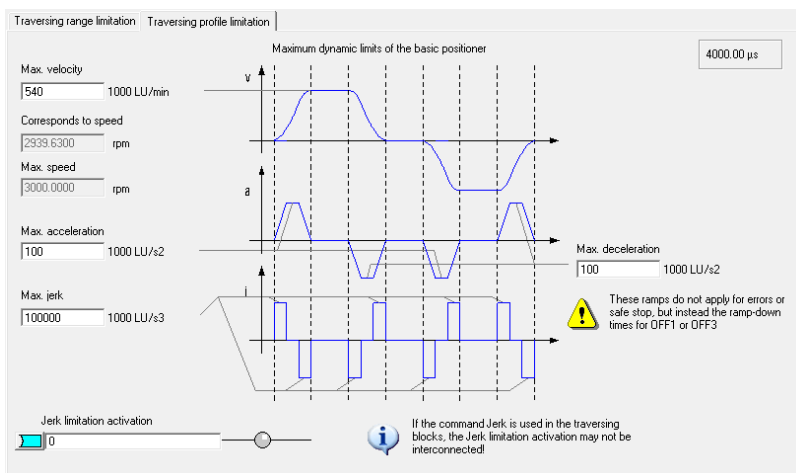
Po parametrizaci pohonů a mechanických převodů je vhodné nastavit určitá omezení, která budou pohon limitovat při odlaďování polohového a otáčkového regulátoru. Limitování pohybu se provádí v záložce *Drives->nazev_osy->Technology->Basic positioner->Limit*. Parametr p2580 omezuje maximální polohu ze spodu a p2581 ze shora. Aktivování limitace je provedena nastavením bitu p2582.



Obr. 47 Nastavení SW koncových poloh

V záložce *Traversing profile limitation* (viz obr. 47) je možné nastavit omezení pro pohyb osy jako je maximální rychlost (p2571), maximální zrychlení (p2572) a maximální zpomalení (p2573). Maximální rychlost (velocity) se nastaví na hodnotu odpovídající maximálním otáčkám motoru. Aktuální přepočty je možné sledovat hned pod polem pro zadávání rychlosti a odpovídá přepočtu zadanému v okně *Mechanics* příslušného pohonu.

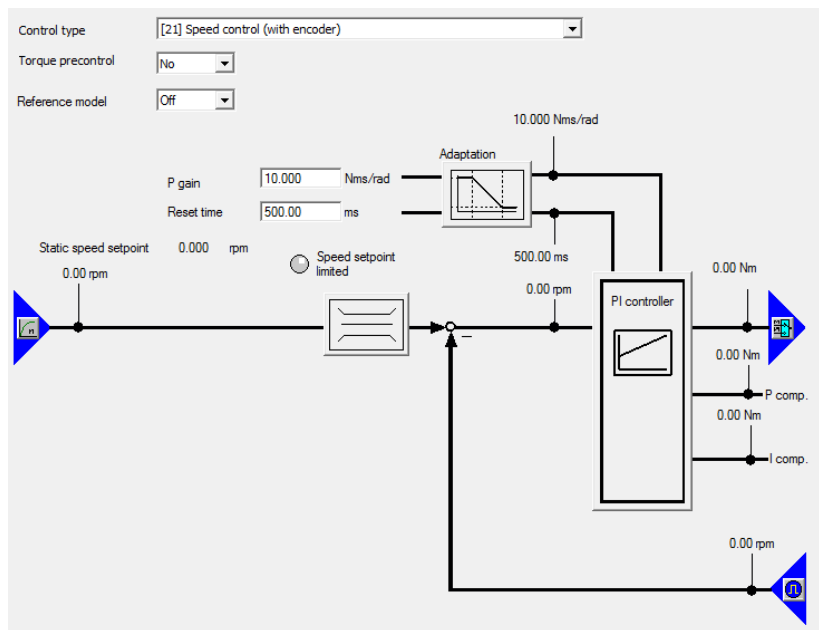
Velikost akcelerace a deakcelerace má vliv na strmost náběžné a sestupné hrany pro průběh žádaných poloh polohového regulátoru.



Obr. 48 Náběžné a sestupné hrany polohového regulátoru

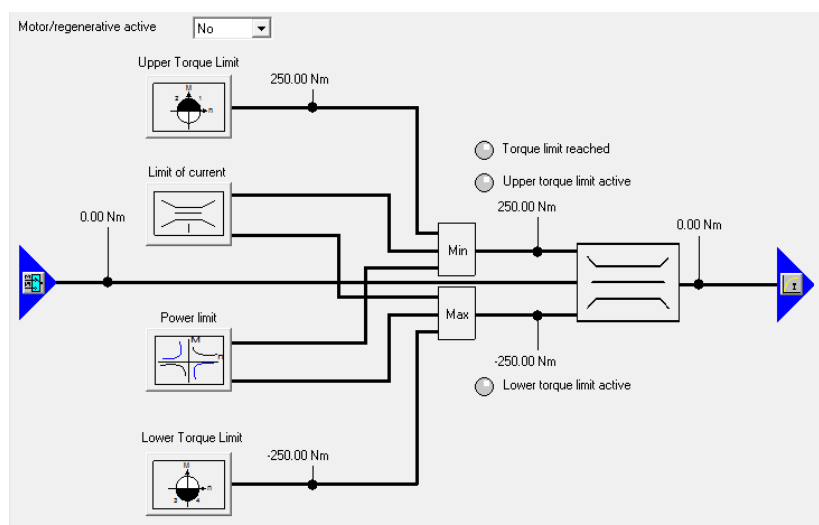
5.5.5 Nastavení otáčkového regulátoru

Nastavení otáčkového regulátoru (viz obr. 49) je možné ze záložky *Drives->nazev_osy->Open-loop/closed-loop control*. Mimo proporcionální (p1460[0]) a integrální (p1462[0]) složky regulátoru je zde možné nastavit filtrace měničem počítaných požadovaných hodnot, rychlost OFF3 rampy (nouzové) apod. Nastavení bylo provedeno experimentálně na základě průběhů z monitorovací funkce programu STARTER (viz. Kapitola 5.6.7).



Obr. 49 Nastavení otáčkového regulátoru

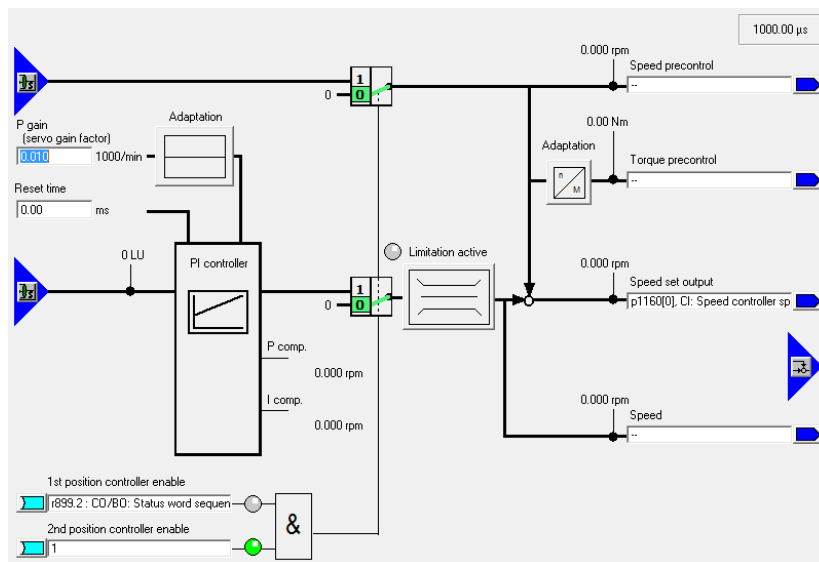
V záložce *Torque limitation* (viz obr. 50) je možné limitovat momenty pohonů a budícího proudu. Omezení proudu je důležité, protože při špatně nastavených regulátorech by mohlo dojít k nekontrolovanému rozkmitání osy či značnému přebuzení pohonu na začátku náběžné rampy a tím k jeho zničení.



Obr. 50 Nastavení momentů

5.5.6 Nastavení polohového regulátoru

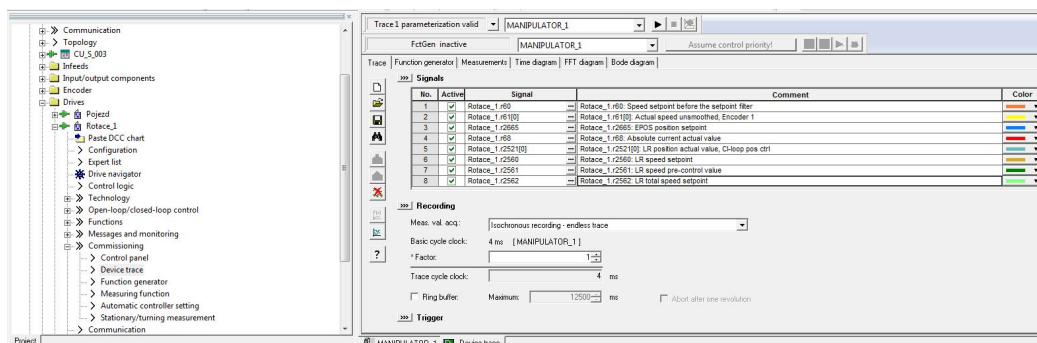
Vzhledem k typu řízení pohonů je nutné správně nastavit polohový regulátor. To je možné ze záložky *Drives->nazev_osy->Technology->Position control->Position controller*. Stejně jako u otáčkového regulátoru, je zde možné mimo proporcionální (p2538[0]) a integrální (p2539[0]) složky regulátoru možné nastavit i filtrace měničem počítaných požadovaných hodnot (viz obr. 51) atd. K nastavení polohového regulátoru je využito taktéž monitorovací funkce a control panelu programu STARTER.



Obr. 51 Nastavení polohového regulátoru

5.5.7 Monitorovací funkce

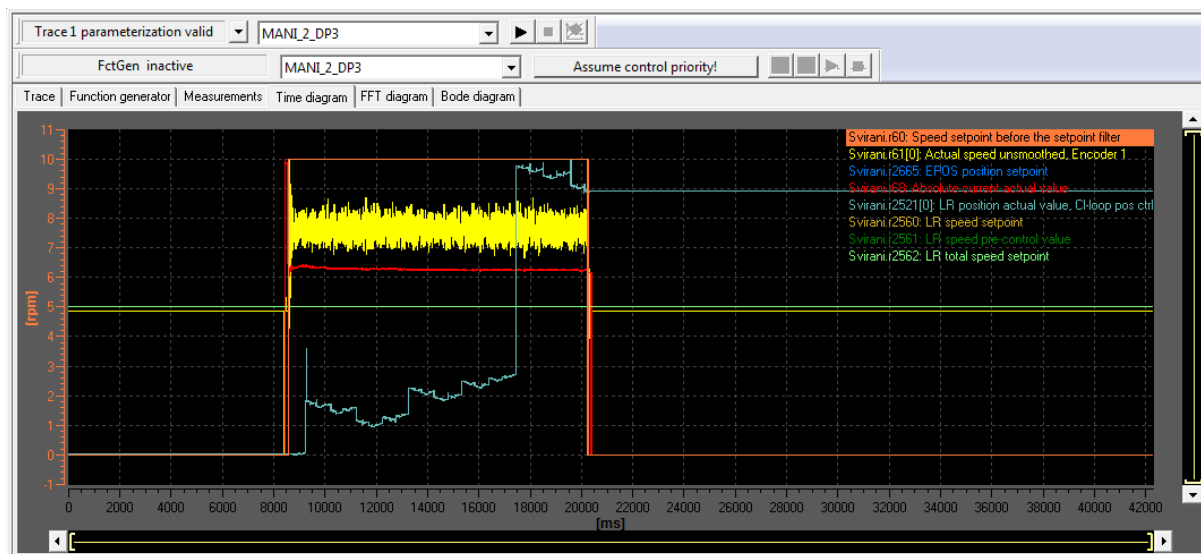
Pro ladění otáčkových a polohových regulátorů je program STARTER vybaven monitorovací funkcí „Device Trace“, díky které je možné průběžně sledovat průběhy jednotlivých veličin (viz obr. 52). Následně je pak možné vyladit otáčkové i polohové regulátory v závislosti na aktuálním vstupním proudu, který je na výstupu frekvenčního měniče SINAMICS S120, což je velice důležité z hlediska ochrany motorů a jejich dlouhé životnosti i funkčnosti. Dále je možné přijít na některá chybná nastavení parametrů a následně je upravit (především nastavení enkodérů).



Obr. 52 Nastavení monitorovacích funkcí

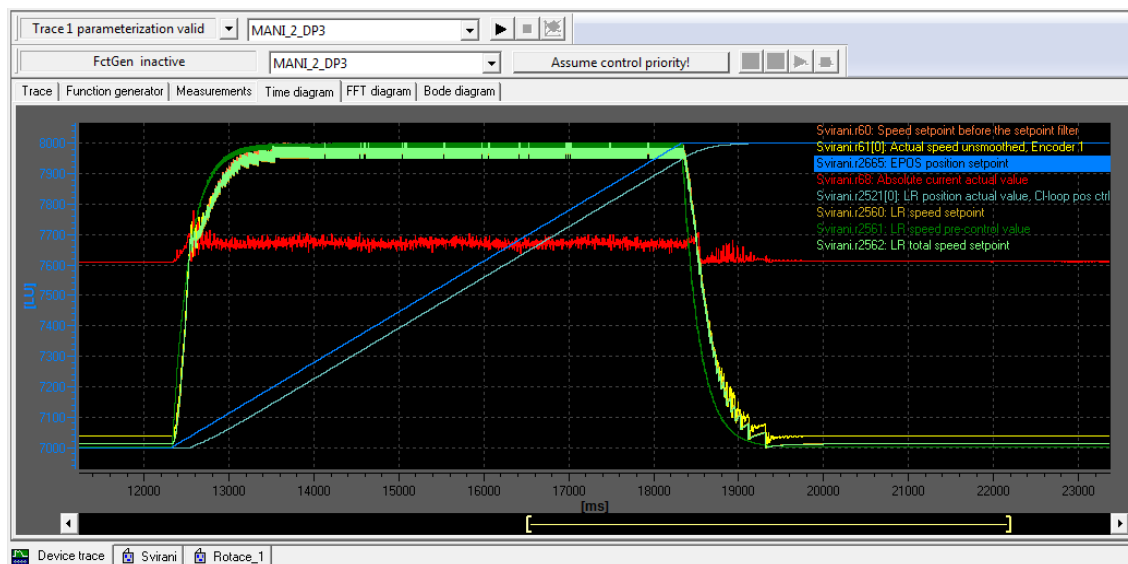
V záložce Trace Device se vyberou sledované veličiny, které se tlačítkem Download stáhnou do měniče. Ve výběru Meas. val. acq. Je možné vybrat časově omezené sledování nebo nekonečné. Pro účel této práce je výhodnější sledování nekonečné.

Na obr. 53 je patrný nesprávný průběh sledované veličiny p2521, která symbolizuje aktuální absolutní polohu SSI enkodéru. Tato chyba je způsobena špatně nastaveným typem kódování (binary, gray).



Obr. 53 Průběh veličiny p2521

Při správném nastavení by měli průběhy vypadat přibližně jako na obr. 54. Průběh aktuálních hodnot z otáčkového IRC enkodéru, následuje předpočítané speed setpointy a aktuální hodnota z lineárního absolutního SSI enkodéru a zase předpočítané polohové setpointy. Proud při dosažení žádané rychlosti kmitá jen nepatrně v řádech desítek mA.

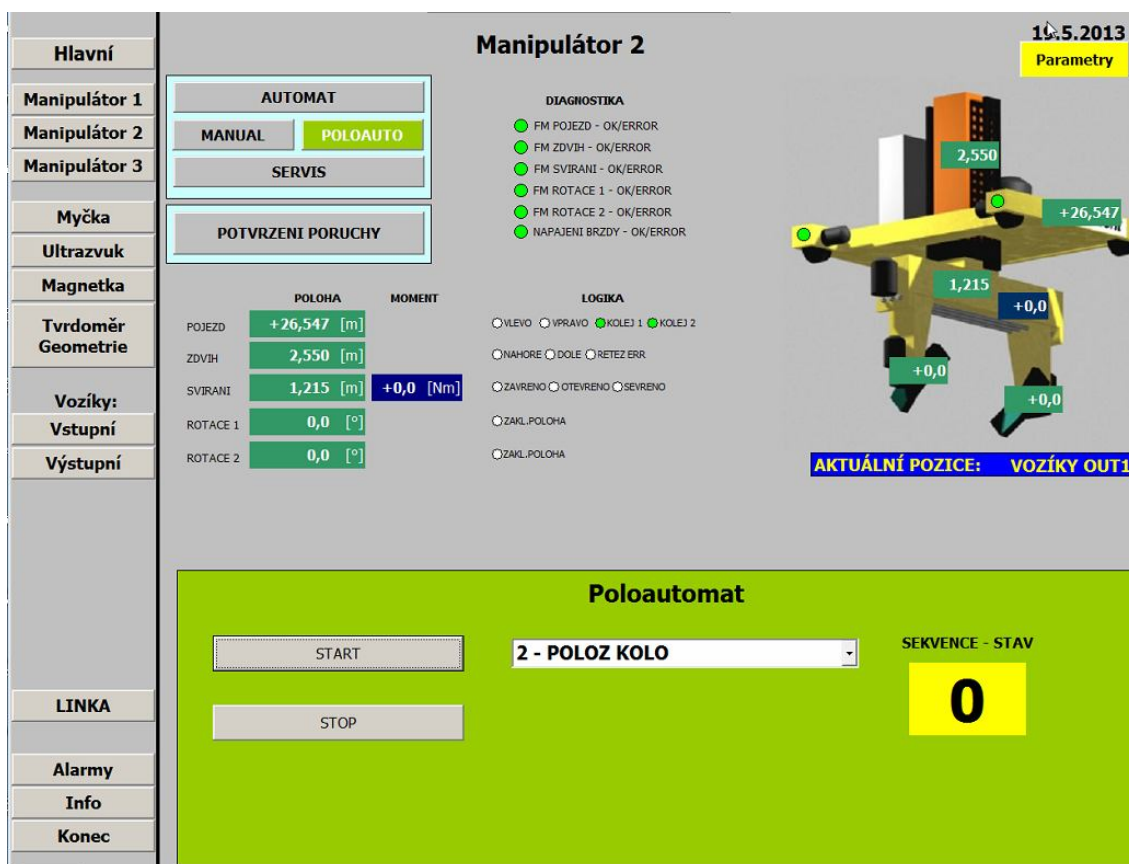


Obr. 54 Průběh aktuálních hodnot z otáčkového IRC enkodéru

5.6 Vizualizace procesu ve WinCC flexible 2008 SP2

Aby bylo možné výrobní proces sledovat či ovládat, je nutné vytvořit vizualizaci a zaškolit obsluhu pro práci s ní. Na obr. 55 je ukázka ovládacího rozhraní pro Manipulátor 2 v poloautomatickém režimu. Polohy všech os, stejně jako poruchové

signály měničů apod. jsou aktualizovány s frekvencí $f = 1$ [s] a slouží ke zlepšení přehledu o aktuálním dění na lince. Vizualizace v programu WinCC flexible 2008 SP2 je přiložena k projektu této práce.



Obr. 55 Ovládací rozhraní pro manipulátor 2

5.6.1 Skriptovací jazyk VISUAL BASIC

Jelikož WinCC flexible explicitně nenabízí možnost průběžného výstupu dat do a z textových souborů, je v tomto projektu použito jednoduchých skriptů. Skript v příkladu níže slouží k načtení dat o velikosti kol z automaticky generovaného textového souboru.

Dim fso, f, Path

Path = "c:\STARMANS\export.txt"

Set fso = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

Set f = fso.OpenTextFile(Path, 1, 1)

SmartTags("internal_tags\D1") = f.ReadLine

SmartTags("internal_tags\S") = f.ReadLine

SmartTags("internal_tags\Y") = f.ReadLine

SmartTags("internal_tags\x") = f.ReadLine

f.Close

SmartTags("koncentrator\KOLO_D") = SmartTags("internal_tags\D1")

SmartTags("koncentrator\KOLO_H") = SmartTags("internal_tags\S")

SmartTags("koncentrator\KOLO_Y") = SmartTags("internal_tags\Y")

SmartTags("koncentrator\KOLO_x") = SmartTags("internal_tags\x")

6. Závěr

Hlavním cílem předložené diplomové práce byl návrh a realizace řídicího systému pro ovládání komplexní testovací linky určené pro nedestruktivní testování železničních kol. Z hlediska testování železničních kol bylo hlavním cílem detekovat a lokalizovat povrchové a podpovrchové vady nacházející se v železničních kolech. Vzhledem ke komplexnosti testovací linky musel navržený řídicí systém kromě samotného řízení procesu testování i řídit předávání a manipulaci železničních kol. Požadavek byl tedy na řízení manipulátorů, které zajišťovaly uvedení železničních kol do prostoru testovací linky.

Z hlediska testování železničních kol byla pro detekci a lokalizaci podpovrchových vad vybrána defektoskopická ultrazvuková metoda. Tato metoda díky velké citlivosti a možné univerzálnosti umožňuje implementaci do průmyslového procesu. Tento proces je v práci relativně podrobně popsán a jsou zde taktéž uvedeny všechny systémy, které navržený řídicí systém v rámci ultrazvukového testování kol řídí. Pro detekci a lokalizaci povrchových vad na železničních kolech byla navržena defektoskopická, magnetická prášková, metoda. Tato metoda je oproti ultrazvukové komplexnější, neboť vyžaduje řízení více procesů. Nicméně navržený řídicí systém umožňoval řízení procesu testování v této defektoskopické lince.

Pro řízení všech systémů a zařízení nacházejících se v testovací lince byl navržen řídicí systém SIEMENS. Návrh byl proveden jednak na základě univerzálnosti systému a jednak na základě požadavků zákazníka. Uvedený systém umožňoval řízení jednotlivých fází testování a předávání železničních kol mezi jednotlivými fázemi testování. Součástí zvoleného systému byla i možnost předávání dat do databáze, která sloužila jako základ pro identifikaci výsledků testování. Navržený řídicí systém byl realizován a v současné době probíhá jeho konfigurace a finální nastavení pro správný a bezpečný proces řízení uvedených defektoskopických linek.

Závěrem je možné konstatovat, že hlavní cíl diplomové práce byl splněn. Byl navržen a realizován řídicí systém pro ovládání komplexní testovací linky. Systém je realizován ve výrobním závodě Ekibastuz ve státě Kazachstán. V současné době probíhá dokončování a parametrizace řídicího systému, který osobně provádím. Výsledek diplomové práce je tedy podpořen i praktickou realizací řídicího systému, což zásadně rozšířilo mé vlastní praktické zkušenosti.

Použitá literatura

- [1] KOPEC, B., Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, 2008.
- [2] Kreidl M. a kol.: *Diagnosticke systémy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [3] MÍŠEK, B., Defektoskopie a provozní diagnostika, VUT Brno, 1992.
- [4] ASM Handbook, Volume 18: Nondestructive evaluation and quality control, ASM International, 1997.
- [5] Vzdělávací centrum pro nedestruktivní testování materiálů
<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/emats.htm>, 18.12.2005.
- [6] Kreidl, Marcel; Šmíd, Radislav. Technická diagnostika. Praha: Nakladatelství BEN, 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [7] Obraz J.: *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha: SNTL, 1976.
- [8] Krautkramer J., Krautkramer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer-Verlag, 4th fully revised edition, 1990, 670 p., ISBN 3-540-51231-4.
- [9] OBRAZ, J., Zkoušení ultrazvukem, SNTL, 1989.
- [10] Jingrong Zhao, Yang Mi, Ke Wang, Yukuan Ma and Jingqiu Yang, Fluorescence Magnetic Particle Flaw Detecting System Based on Low Light Level CCD, http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/magnetic_techniques/631_ma.pdf.
- [11] X Wang, B. S. Wong, C. S. Tan, Y. G. Low and C. G. Tui, Defects detection in magnetic particle inspection application Using Image Processing Techniques, NDT 2010 Conference Topics Session 4B (2) – Analysis/Processing of Inspection Data, <http://www.bindt.org/downloads/4B2.pdf>
- [12] Fundamental Engineering Studies of Magnetic Particle Inspection and Impact on Standards and Industrial Practice Lisa Brasche, Associate Director Engineering Contributors: David Eisenmann, Darrel Enyart, Chester Lo IOWA STATE UNIVERSITY Center for Nondestructive Evaluation <http://www.airlines.org/Documents/NDTForum2012/2012-28-03-Brasche-Rev1-ATA-Sept-2012.pdf>.
- [13] A Paper By Mark Willcox & Emil Weber, An In-line Automatic Billet Magnetic Particle Inspection System, <http://www.insight-ndt.com/papers/technical/t009.pdf>.
- [14] Ali Sophian, Gui Yun Tian, Sofiane Zairi, Pulsed magnetic flux leakage techniques for crack detection and characterisation, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424705004115>
- [15] SIEMENS. *SINAMICS S120: Commissioning Manual*. 2011, 260 s.
- [16] SIEMENS. *SIMATIC: ET200 IM151-7 CPU Interface Module Manual*. 2003, 214 s.

- [17] SIEMENS. *SIMATIC: Programming with STEP 7 Manual*. 2003, 702 s.
- [18] SIEMENS. *SIMATIC HMI: WinCC flexible 2008 Users manual*. 2008, 466 s.
- [19] SIEMENS. *SIMATIC: PROFINET CPU 314C-2PN/DP, CPU 315-2PN/DP, CPU 317-2PN/DP, CPU 319-2PN/DP: Configuring the PROFINET Interface*. 2011, 22 s.
- [20] SIEMENS. *SINAMICS S120: Function Manual*. 2011, 810 s.
- [21] SIEMENS. *SINAMICS S120: EPos Bus Connection*. 2011, 67 s.